

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Conceção de Célula Robótica de Polimento com Sensor de Força Ativo

Tomás Schuller de Almeida e Graça Barbosa

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. José Duarte Ribeiro Marafona

23 de Julho de 2019

Conceção de Célula Robótica de Polimento com Sensor de Força Ativo

Tomás Schuller de Almeida e Graça Barbosa

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Resumo

A automação é um elemento cada vez mais presente no nosso quotidiano, não só em termos industriais mas também a nível social. A automatização de processos industriais adotados pelas empresas tem fulcral importância para o aumento de produtividade e da qualidade dos produtos finais.

A introdução dos robôs em ambientes industriais, e em particular nas operações de acabamento, surge naturalmente através do desenvolvimento de mecanismos capazes de realizar tarefas que exigiriam mão-de-obra qualificada mas com custos associados mais reduzidos e sem que haja quebras na produção.

Na criação de peças em mármore existe a necessidade de dar um acabamento final às peças provenientes da maquinaria CNC, preparando-as para montagem.

Nesta dissertação foram concebidas parcelas de uma célula robótica dedicada a operações de polimento de peças em mármore. Esta dissertação enquadra-se num projeto P2020 que está a ser desenvolvido em conjunto com a empresa TCCWHITESTONE.

Inicialmente, é feita uma contextualização, revisão e compilação do estado da arte do tema proposto, de modo a compreender e expor as particularidades de todo o processo e das suas partes integrantes.

Em seguida, são apresentados os procedimentos de conceção e implementação da célula robótica. Apresentam-se também algumas soluções de células robotizadas de diferentes sectores industriais que são aplicadas em operações de polimento. Posteriormente, são expostas as soluções encontradas para alcançar os objetivos do trabalho.

A realização deste projeto permitiu tirar várias conclusões em relação não só à aplicação da célula em si e uma possível industrialização do processo, mas também aos recursos que foram utilizados e de que maneira será possível a consolidação e o crescimento do projeto.

Abstract

Automation is an element that is increasingly present in recent times, not only in industry but also at a social level. The automation of industrial processes adopted by companies has paramount importance on increasing productivity and quality of their final products.

The introduction of robots in industrial environments, and particularly in finishing operations, appears naturally through the development of mechanisms that are able to perform highly technical skill tasks with lower associated costs and no breaks in production.

In the creation of marble pieces there is a need to finish the pieces from the CNC machining, preparing them for assembly.

In this dissertation it is shown the development of sections of a robotic cell dedicated to polishing operations in marble. This dissertation conforms into a P2020 project that is being developed in conjunction with the company TCCWHITESTONE.

First, a state of the art revision and study is made, to gain a better understanding of the specificities of the whole process and of each section.

Then, the procedures needed to prepare the concept and implementation of the robotic cell are described. Different solutions for polishing cells are also presented, coming from several industrial sectors. Once this is concluded, the solutions found for this project in particular are exposed and debated.

This project allowed several conclusions to be reached, not only about the application of the process itself and its industrialization, but also about all the used resources and the possibility to strengthen the whole project and promote its growth.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu orientador, o Professor José Duarte Marafona, por todo o acompanhamento e disponibilidade demonstrados ao longo deste semestre, desempenhando um papel fulcral para o sucesso deste trabalho.

Quero agradecer à empresa TCC WHITESTONE, em especial ao Eng. Sérgio Costa, pelo interesse demonstrado desde início no resultado final deste projecto e também pelo apoio e material fornecido.

Agradeço, também, ao Professor Luís Galamba Carvalho e ao Professor José Ferreira Duarte pelas suas contribuições à minha formação como engenheiro e por exponenciarem o meu interesse na área.

A todos os meus amigos, e especialmente àqueles que estudam para serem engenheiros, que me acompanharam nos momentos de felicidade e de sofrimento que a vida académica proporciona, muito obrigado.

À Leonor, minha companheira de aventuras e minha companhia de todos os dias, obrigado por tudo. É impossível exprimir em meras palavras tudo o que és.

Por último, quero agradecer à minha família, e em especial aos meus pais, aos meus avós e ao meu irmão Pedro, por serem um exemplo de tudo de bom que a vida nos pode proporcionar, por quererem sempre o melhor para mim e por me incentivarem a ser melhor a cada dia que passa.

Tomás Schuller de Almeida e Graça Barbosa

“A vida constrói-se todos os dias um bocadinho.”

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento e objetivos	1
1.2	Descrição da Empresa	2
1.3	Estrutura da Dissertação	3
2	Revisão Bibliográfica	5
2.1	Robôs Industriais	5
2.1.1	Introdução	5
2.1.2	Principais componentes de um robô industrial	9
2.1.3	Vantagens da utilização de robôs industriais	9
2.1.4	Implementação nos setores industriais	10
2.2	Polimento	12
2.2.1	Introdução	12
2.2.2	Panorama atual	12
2.2.3	Propriedades	13
2.3	Controlo de Força	14
2.3.1	<i>Through-the-Arm Force Control</i>	16
2.3.2	<i>Around-the-Arm Force Control</i>	16
2.4	Células Robóticas	17
2.4.1	Introdução	17
2.4.2	<i>Layout</i> de uma célula robotizada	17
2.4.3	Programação de Robôs	18
2.4.4	Segurança	20
3	Conceção e Implementação de uma Célula Robotizada para Polimento	23
3.1	Definição do problema	23
3.2	Objetivos do projeto	23
3.3	Análise de soluções existentes	24
3.3.1	SandRob	24
3.3.2	SMARTFinish	25
3.4	Processo de escolha do Software	26
3.4.1	Sprutcam 12	27
3.4.2	Robotmaster V7	28
3.4.3	OCTOPUZ	29
3.4.4	PowerMill	30
3.4.5	Análise Comparativa	31
3.4.6	Conclusão	32
3.5	Escolha do sistema AFC (Active Force Control)	33

3.5.1	ATI Compliance Device Model U1-050	33
3.5.2	PushCorp AFD1100	34
3.5.3	FerRobotics ACF HD	35
3.5.4	Cumprimento dos requisitos	36
3.6	Escolha do sistema de troca rápida de ferramenta	36
3.6.1	ATI QC-22	36
3.6.2	SCHUNK SWS-041	37
3.6.3	Análise Comparativa e Conclusão	38
3.7	<i>Design process</i> das peças do EOAT	39
3.7.1	Adaptador Braço-AFC	39
3.7.2	Adaptador AFC-Troca de ferramenta	42
3.7.3	Suporte da ferramenta de polimento	44
3.8	<i>Design</i> da mesa porta-ferramentas	46
3.9	Escolha do robô industrial	49
3.9.1	ABB IRB6700-200	49
3.9.2	Outras opções	50
4	Conclusões e Trabalho Futuro	53
4.1	Satisfação dos Objetivos	54
4.2	Trabalho Futuro	54
	Referências	55
5	Anexos	59
	Anexos	59
A	Singularidades	61
B	Níveis de classes de proteção IP	63
C	Desenho Técnico: Adaptador Braço-AFC	65
D	Desenho Técnico: Adaptador AFC-Troca de ferramenta	67
E	Desenho Técnico: Suporte da ferramenta de polimento	69

Lista de Figuras

1.1	Exemplo de produto da empresa	2
2.1	Prótese da anca com acabamento superficial de grande qualidade, obtido numa célula robotizada	11
2.2	Polimento de uma torneira numa célula robotizada	11
2.3	Representação da trajetória da ferramenta de polimento	14
2.4	Representação básica de um sistema de controlo ativo de força	15
2.5	Impacto das forças gravíticas	17
2.6	<i>Layout</i> típico de célula robótica com robô centrado	18
2.7	<i>Layout</i> típico de célula robótica com robô em série	18
2.8	Representação esquemática do processo de redução do risco, incluindo o método iterativo das três etapas	21
3.1	Célula SandRob	25
3.2	Software ARPP	25
3.3	Célula SMARTFinish	26
3.4	Interface Sprutcam	27
3.5	Interface Robotmaster	28
3.6	Interface OCTOPUZ	29
3.7	Relatório do <i>PathAnalyser</i>	29
3.8	Interface PowerMill	30
3.9	Detalhe da parametrização de ferramentas	31
3.10	ATI U1-050	34
3.11	PushCorp AFD1100	34
3.12	FerRobotics ACF HD	35
3.13	ATI QC-22	37
3.14	SCHUNK SWS-041	38
3.15	Padrão de furação do braço robótico	39
3.16	Padrão de furação do AFC	40
3.17	Adaptador Braço-AFC	40
3.18	Robô sem adaptador a 45°	41
3.19	Robô com adaptador a 45°	41
3.20	Padrões de encaixe mecânico das peças	42
3.21	Adaptador AFC-Troca de ferramenta	43
3.22	Método de acoplamento entre as peças	43
3.23	Polidora manual a ser utilizada	44
3.24	Modelo CAD da ferramenta de polimento	44
3.25	Suporte da ferramenta de polimento	45

3.26	Conjunto de suporte da ferramenta de polimento e <i>End-Of-Arm-Tool</i>	45
3.27	Mesa porta-ferramentas	47
3.28	<i>Brackets</i> de suporte de ferramentas	48
3.29	Conjunto mesa-ferramentas	48
3.30	Resultados da simulação, obtidos usando o <i>software</i> ANSYS	49
3.31	ABB IRB6700-200	50
3.32	FANUC R-2000iC/210WE	51
3.33	Yaskawa MH215 II	52
A.1	Numeração dos eixos de um robô	62
C.1	Desenho Técnico: Adaptador Braço-AFC	66
D.1	Desenho Técnico: Adaptador AFC-Troca de ferramenta	68
E.1	Desenho Técnico: Suporte da ferramenta de polimento	70

Lista de Tabelas

2.1	Cronograma da história dos robôs industriais	7
3.1	Análise Comparativa de aspetos não-técnicos	32
3.2	Cumprimento dos requisitos propostos	36
3.3	Especificações do sistema ATI QC-22	37
3.4	Especificações do sistema SCHUNK SWS-041	38

Capítulo 1

Introdução

Com o avanço da tecnologia, a utilização de robôs e a automatização de processos tem substituído em grande parte a presença humana nas linhas de produção. A utilização de robôs na indústria de transformação da pedra é uma aplicação que começa a surgir na Europa e pode vir a mostrar ser uma vantagem tecnológica e económica.

Hoje em dia, os robôs são componentes essenciais de uma fábrica e cada vez mais importantes no caminho para as Fábricas do Futuro.

1.1 Enquadramento e objetivos

Esta dissertação de mestrado enquadra-se como projeto final do 5º ano do curso de Engenharia Mecânica, especialização de Produção, Conceção e Fabrico, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O tema desta dissertação aborda a conceção e a implementação de uma célula robotizada para polimento de peças em mármore.

Esta dissertação está enquadrada num projeto P2020 que está a ser desenvolvido em conjunto com a empresa TCCWHITESTONE.

Assim, a concretização deste projeto tem a finalidade de:

- Conceber parcelas de uma célula de polimento automatizado;
- Conceber um EOAT (*End-Of-Arm-Tool*) e todas as suas partes integrantes;
- Definir os sistemas auxiliares a serem implementados;
- Parametrizar a célula em ambiente virtual.

1.2 Descrição da Empresa

A empresa, com a designação social de TCCWHITESTONE, Unipessoal, Lda., foi constituída em julho de 2007 pelos sócios Benjamim Teixeira da Costa e Sérgio Manuel Martins da Costa.

Fazendo uma breve retrospectiva, a atividade da empresa até 2012 incidia na importação e distribuição de mármore em bloco e chapa para as empresas de transformação, tendo progressivamente alargado a intervenção para o fornecimento de pedra já cortada e acabada, com recurso a subcontratação, tendo evoluído posteriormente para a área de prestação de serviços de consultoria a prescritores, nomeadamente gabinetes de engenharia e arquitetura, com aconselhamento especializado e técnico quer no domínio da seleção e escolha de pedras, quer no plano da sua aplicação.

O processo produtivo começa com a chegada de lajes e blocos de mármore, que são catalogados em relação ao seu tamanho. Depois, a sua maquinagem é feita por máquinas CNC, onde é dada às peças a sua forma final. Daí, passam para a estação de polimento, onde as peças são polidas à mão por operários. Finalmente, ocorre a montagem das peças (pernas de mesas, etc.) e os produtos são embalados.

A empresa realiza a distribuição dos seus produtos através de *e-commerce* e vendas diretas. O enquadramento da empresa no ramo faz-se pela produção e desenvolvimento de produtos próprios, ajustados e customizados face às necessidades dos clientes, já que, habitualmente, as empresas do sector não têm desenvolvimento e design próprios, antes produzindo para redes e empresas de comercialização com base em projetos e modelos fornecidos. Estes projetos implicam peças que são partes integrantes de mobiliário, tendo como exemplo mesas, lavatórios e *sideboards*. Isto coloca a empresa num posicionamento diferenciado, na medida que desenvolve os seus próprios produtos e aponta para a primazia da pedra natural na fabricação de mobiliário.



Figura 1.1: Exemplo de produto da empresa [1].

Recentemente, a TCCWHITESTONE tem tido um aumento significativo no seu volume de negócios e, conseqüentemente, isso leva a uma necessidade de inovar na implementação de processos e de produtos através de novos equipamentos e *softwares*. Estes representam um avanço tecnológico e melhoram não só a sofisticação do produto e dos processos, nomeadamente ao nível da gestão e controlo e do planeamento, como também a capacidade produtiva e a qualidade a oferecer ao cliente.

1.3 Estrutura da Dissertação

Para além da introdução, esta dissertação contém mais 3 capítulos.

No Capítulo 2, é feita uma introdução aos robôs industriais e às suas aplicações.

Também é feita uma breve descrição do conceito de acabamento superficial, sendo apenas caracterizado com mais detalhe o processo de polimento, sendo o processo com maior relevância para este trabalho. Expõe-se também o estado da arte de outros conteúdos relevantes, como sistemas de controlo de força (FC - *force control*) e segurança na robótica industrial.

No Capítulo 3, são fornecidos, com os devidos detalhes, os procedimentos de conceção e implementação da célula robótica. Apresentam-se também algumas soluções de células robotizadas já existentes, e são comentadas algumas dificuldades encontradas durante o processo de desenvolvimento do projeto. Por fim, são expostas as soluções encontradas para alcançar os objetivos do trabalho.

No Capítulo 4, debate-se a satisfação dos objetivos propostos, é exposta uma conclusão do trabalho e são descritos alguns possíveis trabalhos futuros.

No fim, constam as Referências consultadas para a realização desta dissertação, seguidas dos Anexos.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é feita uma introdução aos robôs industriais e às suas aplicações.

Também é feita uma breve descrição do conceito de acabamento superficial e processos de produção de componentes, e é caracterizado o processo de polimento, o processo de maior relevância neste trabalho. Em seguida, expõe-se o estado da arte do acabamento superficial com robôs nas indústrias de fabrico de componentes, assim como de sistemas de controlo de força (FC), que serão também explicados.

2.1 Robôs Industriais

2.1.1 Introdução

Antes de se abordar a história dos robôs industriais, é necessário primeiro definir os termos robótica e robô industrial. Na secção seguinte irão ser mencionadas algumas leis fundamentais e definições sobre robótica.

2.1.1.1 Leis Fundamentais da Robótica

Seria impossível escrever uma introdução sobre este tema sem mencionar as leis fundamentais da robótica. Estas foram formuladas pelo conhecido investigador russo Isaac Asimov [2].

O termo robótica também foi cunhado por Asimov, sendo definido como a ciência dedicada ao estudo dos robôs. Desde o estabelecimento das leis, citadas abaixo, a palavra robô ganhou um significado alternativo, sendo então um produto industrial concebido por engenheiros ou técnicos especializados [3, 4, 5].

1. "Um robô não pode ferir um ser humano ou, por inação, permitir que um ser humano sofra algum mal."
2. "Um robô deve obedecer às ordens que lhe sejam dadas por seres humanos exceto nos casos em que tais ordens entrem em conflito com a Primeira Lei."

3. "Um robô deve proteger a sua própria existência, desde que tal proteção não entre em conflito com a Primeira ou Segunda Leis." [2]

Estas leis foram completadas em 1985 pela lei Zero de Asimov, acima de todas as outras.

0. "Um robô não pode causar mal à humanidade ou, por omissão, permitir que a humanidade sofra algum mal." [3]

2.1.1.2 Máquinas e Robôs

A distinção entre robôs e máquinas depende principalmente da sofisticação e da programabilidade do dispositivo. Por exemplo, uma fresadora de controlo numérico computadorizado (CNC) não é considerada um robô industrial [6].

A grande variedade e versatilidade de ferramentas e a possibilidade de se ter uma grande área de trabalho em relação ao volume do robô em si são também propriedades que definem um robô industrial. Uma máquina CNC é dedicada a uma tarefa específica, embora com alguma adaptabilidade, que leva a uma limitação de especificações e de flexibilidade do sistema [4, 5].

O estatuto desta tecnologia pode ser refletido pela definição de um robô pelo Instituto Americano de Robôs. Este define robô como "um manipulador multifuncional reprogramável criado para mover materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especializados através de percursos variáveis e programados para aumentar a performance de diversas tarefas" [5].

O elemento chave desta definição é a palavra "reprogramável", que confere ao robô características como a adaptabilidade e utilidade. Também deverá ter memória e lógica para ser capaz de ser utilizado em diversas tarefas sem a necessidade de operações de maior importância na estrutura.

2.1.1.3 Robótica

O termo robótica pode ser definido como "a ligação inteligente entre a percepção e a ação" [5].

O estudo deste ramo advém de uma mistura de campos mais clássicos da ciência. Da engenharia mecânica, pode-se estudar a máquina em situações de estática e dinâmica. Os seus movimentos espaciais podem ser definidos em termos matemáticos, e a teoria do controlo permite criar e avaliar algoritmos para obter os movimentos pretendidos. O ramo da engenharia eletrotécnica revela-se importante no que conta ao *design* de sensores e interfaces para robôs industriais, e a ciência da computação permite a programação dos dispositivos para a realização de uma certa tarefa [6].

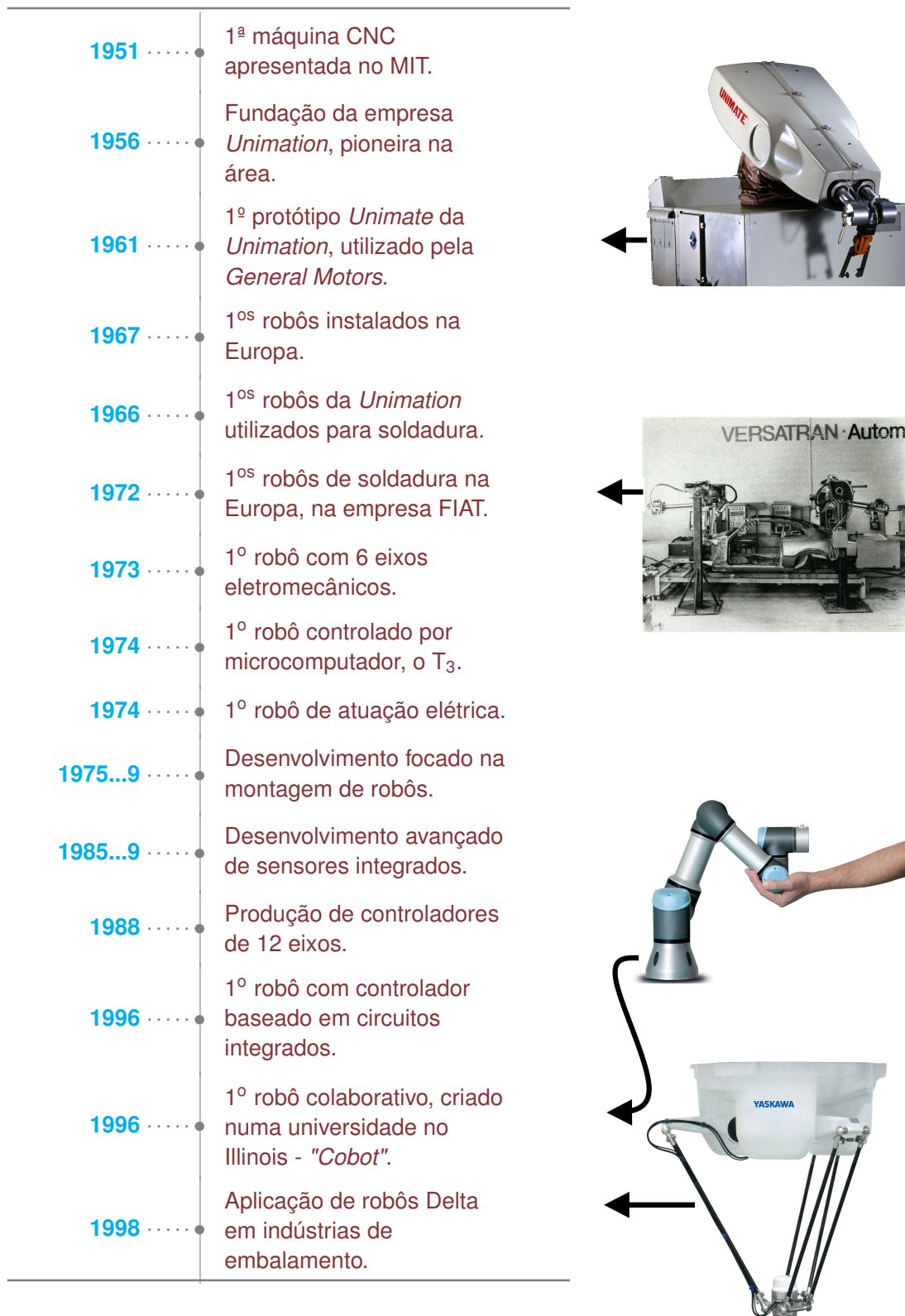
2.1.1.4 Robôs na indústria

A robótica teve uma evolução radical no século XX, com a criação de máquinas cada vez mais sofisticadas e complexas e até mesmo de robôs que se confundem com seres humanos em termos de locomoção e autonomia na realização de tarefas.

O crescimento e evolução do setor industrial tornou possível o aparecimento de robôs capazes de desempenhar tarefas consideradas perigosas ou monótonas para operadores humanos, assim como aumentar a produtividade.

Na tabela 2.1 está representado um cronograma dos principais eventos neste tema.

Tabela 2.1: Cronograma da história dos robôs industriais [7].



Focando nos processos de maquinagem, mais especificamente no processo de polimento, a robótica também se está a expandir a grande velocidade.

Para a área da maquinagem, diversos fabricantes de robôs industriais disponibilizam robôs específicos, pelo que em seguida são apresentados alguns exemplos.

- **ABB** (ASEA *Brown Boveri*)

- Este grupo empresarial surgiu da fusão de duas grandes empresas: a ASEA (*Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget*) e a *Brown Boveri*. Atualmente o grupo ABB tem a sede em Zurique, na Suíça, tendo representantes em mais de 100 países e empregando cerca de 145.000 pessoas na área de Automação e de Energia. Os robôs mais adequados para operações de maquinagem deste grupo são os da série IRB 6700. A capacidade de carga destes robôs é de 150-300 kg, tem um alcance de 2.6 a 3.05 m, um peso de 1300-1750 kg, uma repetibilidade de ± 0.1 mm e apresenta uma estrutura revoluta com 6 graus de liberdade [8].

- **KUKA** (*Keller und Knappich Augsburg*)

- Sediada em Augsburg, na Alemanha, a KUKA é uma empresa alemã fundada em 1898 por Johann Josef Keller e Jakob Knappich. Atualmente, é líder de mercado na Alemanha e está dentro dos quatro primeiros fabricantes de robôs industriais em todo o mundo. Na área da Robótica, a KUKA Robot Group tem como objetivos principais o desenvolvimento, produção e venda de robôs industriais, controladores e *software*. Um robô fabricado por esta empresa adequado para operações de maquinagem é o KR QUANTEC nano. Apresenta uma repetibilidade de ± 0.05 mm, 6 graus de liberdade, capacidade de mover cargas até 300 kg e um alcance máximo de 2.1 m [9].

- **Yaskawa Motoman**

- Fundada em 1989, a Yaskawa Motoman é uma empresa líder em robótica industrial. Com mais de 400.000 robôs industriais Motoman, 15 milhões de servomotores e 26 milhões de inversores instalados globalmente, a Yaskawa fornece produtos e soluções de automação para praticamente todos os setores e aplicações robóticas; incluindo soldagem a arco, montagem, corte de material, remoção de material, embalagem, etc. A série mais utilizada para operações industriais é a série MH, que tem diversos robôs capazes das mais variadas tarefas [10].

- **Stäubli**

- A Stäubli, atualmente sediada na Suíça, fornece soluções em duas áreas muito distintas: têxtil e robótica. Esta empresa, fundada em 1892, emprega atualmente mais de 4000 pessoas. No que diz respeito a robôs industriais para processos de maquinagem, um robô com características interessantes deste grupo é o RX 200L HSM. Apresenta uma repetibilidade de ± 0.4 mm, capacidade de carga de 60 kg e um alcance de 2.594

m. Tem 6 graus de liberdade e o motor-árvore (*spindle*) vem integrado no braço do robô [11].

2.1.2 Principais componentes de um robô industrial

De acordo com a norma ISO 8373, um robô industrial é definido como: "Um manipulador controlado automaticamente, multiuso, reprogramável em três ou mais eixos, que pode ser fixo ou móvel para uso em aplicações de automação industrial"[12]. Esta definição pode corresponder a diferentes estruturas e funcionalidades, sendo no entanto possível identificar os seguintes elementos funcionais principais:

- O manipulador, que é a estrutura principal "física" do robô, sendo referido usualmente como o "braço" do robô, e que é composto por um conjunto de corpos rígidos que, ligados por juntas, formam uma cadeia cinemática. Neste elemento, podem estar também incluídos atuadores e sensores que sejam necessários no robô. O dispositivo que faz a ligação entre o manipulador e o ambiente de trabalho tem por objetivo realizar as tarefas definidas pelo utilizador. Este é normalmente denominado *End-Of-Arm Tool* - EOAT.
- O controlador, um elemento baseado num computador com funções específicas. Este inclui funções de controlo que estão associadas tanto aos eixos do robô como a outros dispositivos externos ao "braço", que podem fazer parte da EOAT ou não. A linguagem que rege este controlador é específica para cada fabricante. Juntamente com o mesmo, existe uma consola portátil que permite a interação entre robô e utilizador. A programação pode ser feita *on-line* (na consola ou diretamente no robô) ou *off-line* (no computador).
- A unidade de potência, da qual fazem parte os dispositivos que integram o circuito elétrico e de potência, tem por finalidade fornecer energia aos atuadores internos ou externos.

2.1.3 Vantagens da utilização de robôs industriais

Do ponto de vista conceptual, a utilização de robôs industriais pode ser vista como uma hipótese bastante interessante para a maquinaria, nomeadamente devido às seguintes razões [13]:

1. Um robô industrial pressupõe logo à partida uma máquina com um número elevado de graus de liberdade, dotando-o de uma grande manobrabilidade para as operações de maquinaria;
2. O robô pode movimentar os produtos, algo que na maquinaria executada por máquinas CNC é realizado por um operador;
3. Um robô industrial pode ser facilmente instalado sobre uma plataforma com um eixo linear, por exemplo sobre carris, aumentando o seu volume de trabalho.

No que diz respeito aos aspectos económicos, a aplicação dos robôs em operações de acabamento possibilita a redução óbvia de custos com mão-de-obra, mas também dá origem a uma

melhor utilização de ferramentas e outros consumíveis, com redução dos custos associados. A rapidez com que o robô executa as tarefas designadas possibilita a redução dos tempos de produção e, no caso de se encontrarem inseridos numa linha de produção, a redução de tempos de espera. Em comparação com outras máquinas dedicadas ou com operários especializados, a célula robotizada representa um investimento com um bom rácio preço/performance [14].

Utilizar robôs industriais para a execução de operações de acabamento possibilita aliviar operadores humanos de trabalhos repetitivos, poeirentos e, por vezes, com a libertação de gases tóxicos, evitando assim lesões e doenças profissionais.

Por outro lado, a utilização de robôs na maquinagem também tem algumas desvantagens, que têm que ver com a sua baixa rigidez em relação a máquinas CNC, pelo que é difícil absorver/rejeitar vibrações resultantes dos processos de maquinagem, prejudicando a obtenção de uma boa exatidão no posicionamento da ferramenta.

Para além destes problemas, uma das dificuldades na utilização de robôs para aplicações de maquinagem convencionais (ex. polimento), resulta de problemas particulares de programação. Os robôs foram pensados sempre como manipuladores para descrever trajetórias, ou percursos pré-definidos, bastando para isso o conhecimento da “forma” a seguir, para a definição do seu programa. No caso da maquinagem, é necessário, para além da trajetória, o conhecimento da forma inicial e a estratégia a seguir para, através de vários percursos, retirar o volume de material necessário para obter a forma final. Mesmo havendo várias soluções possíveis, as ferramentas de *software* para programação de robôs industriais não estão sempre vocacionadas para este tipo de aplicação.

2.1.4 Implementação nos setores industriais

Devido às evidentes vantagens, são várias as indústrias que recorrem com sucesso a células de acabamento robotizadas [15]:

- Aeroespacial: pás de turbinas, câmaras de combustão, fuselagem;
- Cutelaria;
- Sanitária: torneiras, chuveiros (Figura 2.2);
- Canalização;
- Indústria marítima: hélices;
- Automóvel: blocos de motores, elementos da carroçaria (para-choques, tejadilho), jantes;
- Médica: implantes (Figura 2.1).



Figura 2.1: Prótese da anca com acabamento superficial de grande qualidade, obtido numa célula robotizada [16].



Figura 2.2: Polimento de uma torneira numa célula robotizada [17].

2.2 Polimento

2.2.1 Introdução

Sendo o polimento um processo de maquinagem, começa por se definir maquinagem.

Maquinagem é o termo utilizado para descrever o processo de fabrico de peças por remoção de material. As operações de maquinagem são usualmente categorizadas em:

- Processos de corte convencionais por arranque de apanha, por exemplo:
 - torneamento;
 - furação;
 - mandrilagem;
 - fresagem;
 - entre outros.
- Processos abrasivos, como por exemplo polimento ou retificação, entre outros.
- Processos não-tradicionais – com recurso a fontes de energia elétrica e química - como, por exemplo, maquinagem eletroquímica, maquinagem por feixe de eletrões, etc.

Neste trabalho, e de acordo com a temática da dissertação, é considerado apenas o processo de polimento, visto ser o processo em questão e um dos processos de fabrico em que o emprego de robôs industriais tem começado a surgir.

A operação de polimento é normalmente a última operação mecânica de acabamento superficial aplicada a uma peça. Este processo é utilizado para eliminar pequenos entalhes e riscos, conferindo às superfícies trabalhadas um aspecto brilhante e por vezes espelhado.

Como o polimento é uma operação suave com o objectivo de não alterar a geometria final da peça, as ferramentas utilizadas são compostas por materiais macios que se adaptam às formas a trabalhar. Os principais constituintes dos discos de polimento são resinas ou fibras sintéticas que podem operar habitualmente em conjunto com massas lubrificantes de polimento. A evolução neste ramo tecnológico permitiu a produção de discos de polimento que trabalham a seco (sem massa lubrificante) com boas propriedades de dissipação de calor. São, pois, discos desse tipo que são utilizados em operações de polimento robotizadas.

2.2.2 Panorama atual

No atual ambiente industrial, os requisitos para o fabrico de peças de precisão de alta qualidade com geometrias complexas têm aumentado. A fim de se obter uma boa qualidade final, uma peça de trabalho, geralmente, passa por maquinagem de desbaste, de acabamento e por uma etapa de polimento, no processo de maquinagem.

Nos últimos anos, com o rápido desenvolvimento da ciência e tecnologia, e aliada à moderna teoria de controlo, a maquinaria flexível com o uso de máquinas de cinco eixos foi sendo aperfeiçoada gradualmente e tornou-se uma tecnologia capaz de realizar as tarefas de maquinaria de desbaste e acabamento.

No entanto, o processo de polimento depende principalmente da operação manual de trabalhadores qualificados, o que leva a uma baixa eficiência de produção, qualidade de acabamento superficial instável e não pode atender aos requisitos de baixo custo, curtos ciclos e alta qualidade necessários na indústria.

2.2.3 Propriedades

Existem vários factores no polimento que podem afetar o resultado final. Entre estes, os factores mais importantes que determinam a rugosidade superficial da peça final são o tamanho de grão do abrasivo, $G(\mu m)$, a pressão de contacto entre a ferramenta e a peça, $P_c(kPa)$, a velocidade de rotação da ferramenta $\omega(rpm)$ e a velocidade de translação da ferramenta $v_f(mm/s)$.

Os abrasivos mencionados anteriormente comportam-se como ferramentas de corte que removem material na superfície, cortando os picos de rugosidade superficial.

A força normal pressiona o disco abrasivo contra a superfície. Combinada com a rotação do disco, a ferramenta possui a potência necessária para cortar o material. À medida que a força normal (e, portanto, a pressão de contacto) aumenta, a taxa de remoção de material torna-se maior. Na área do polimento de peças, presume-se que a geometria das mesmas tenha sido maquinada até à sua forma final. O que se pretende fazer é apenas remover o material em excesso na superfície da peça. Uma potência excessiva da ferramenta pode causar danos na superfície, queimando-a ou causando a desfiguração da geometria da peça. Portanto, uma maior pressão, que normalmente se traduz num aumento da *material removal rate* (*MRR*), ou seja a taxa de remoção de material, nem sempre é favorável, pois pode levar a problemas na superfície da peça.

Num certo intervalo de tempo, o número de vezes que a ferramenta passa por uma determinada área aumenta com a velocidade de rotação da ferramenta ω , tendo como base uma velocidade de translação constante. Assim, a "densidade" da trajetória de polimento irá também aumentar com o aumento da velocidade do disco abrasivo. Uma maior velocidade rotacional também resulta numa maior geração de energia e calor na peça e num aumento da *MRR* [18].

A velocidade de translação da ferramenta v_f é a velocidade tangencial ao longo da trajetória de polimento. Se essa velocidade for demasiado baixa, a *MRR* por unidade de área tornar-se-á muito elevada, devido à rotação do disco abrasivo. No entanto, o aumento da velocidade de translação irá resultar numa diminuição da eficácia do polimento, não atingindo uma rugosidade uniforme na peça.

O trajeto da ferramenta é também um detalhe que não deve ser negligenciado. Um trajeto normal gerado numericamente é geralmente monotónico, sendo uma linha que viaja por toda a peça como se de uma comum maquinaria se tratasse. Este trajeto é diferente do realizado pelos operadores manuais, sendo que estes adicionam um outro movimento ao inicial. Os operadores realizam um movimento orbital em torno da trajetória linear que seguem, para completar o polimento da

peça. Esse movimento tem a vantagem de aumentar a densidade da trajetória da ferramenta. Como este movimento é executado "dentro" do movimento linear, o movimento cicloidal resultante cobre uniformemente a superfície da peça e leva a um corte de cada secção da peça em várias direções, que é desejável para atingir a rugosidade superficial prevista.

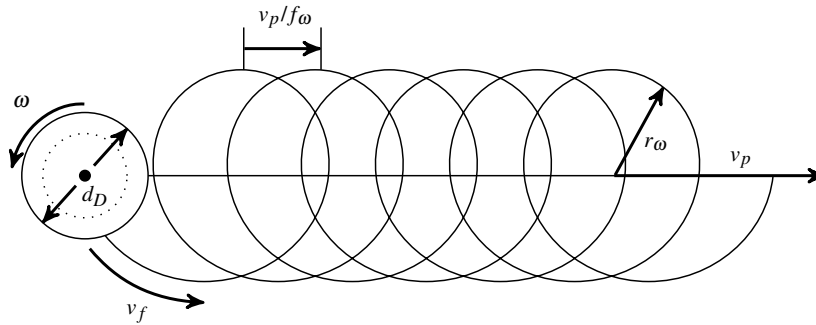


Figura 2.3: Representação da trajetória da ferramenta de polimento

A frequência orbital, f_ω , é definida como o número de rotações que são feitas na trajetória secundária (movimento orbital), em torno do trajeto principal (movimento linear), por minuto. Uma maior frequência orbital produz uma maior densidade de polimento, mas também pode causar vibrações indesejadas no robô. Um aumento do raio de órbita, r_ω , aumenta a área varrida no mesmo tempo. Quando o raio de órbita iguala o diâmetro do disco abrasivo, d_D , a área central "menos densa" pode ser totalmente coberta num ciclo, o que resulta num polimento mais uniforme. A velocidade da trajetória principal, v_p , é a velocidade medida apenas no percurso principal da ferramenta. Uma velocidade v_p demasiado baixa abranda o processo de polimento, podendo levar à degradação da peça. Um bom valor para esta velocidade é obtido igualando a mesma à de um diâmetro do disco por período de movimento cíclico $1/f_\omega$ [18].

2.3 Controlo de Força

A tecnologia de controlo de força surgiu para completar uma lacuna nos processos de fabrico automatizados. Em diversos processos de fabrico as peças são levadas a uma forma final através de forjamento, maquinagem, fundição ou moldação. Estas peças poderão cumprir o toleranciamento dimensional necessário, mas necessitam de processamento adicional para obter o acabamento superficial desejado. No caso da maquinagem, marcas residuais e rebarbas são retiradas da peça. Outros processos, como a fundição injetada, necessitam da remoção de linhas de apartação, excesso de material, gitos, etc. Estas operações de acabamento são operações em que a mudança para um processo controlado por força em vez de um processo com "input" dimensional é necessário.

A remoção de rebarbas, linhas de apartação e o polimento de peças normalmente necessitam de uma intervenção humana. Essa intervenção implica uma forma de complacência (*compliance*), que é uma propriedade que as máquinas rígidas e baseadas em posição não têm. A complacência, no ramo do acabamento superficial automatizado, é a capacidade de compensar um desfasamento

entre a ferramenta e a superfície da peça, e é controlada através do contacto, em vez do controlo por coordenadas.

A primeira propriedade a ter em conta é o controlo da quantidade de força aplicada pela ferramenta. No acabamento superficial, a ferramenta é normalmente um abrasivo, e a força aplicada afeta diretamente a *MRR*.

A complacência também permite a diminuição do número de pontos que é necessário programar no robô para ser possível seguir uma trajetória curvilínea, tanto porque o robô irá ajustar a sua trajetória, ou porque o controlador irá estender ou retrainir para seguir o perfil da peça. Isto reduz a probabilidade de se danificar a peça com a ferramenta ou de se perder o contacto com a peça [19].

É possível obter esta capacidade de controlo por força através de uma grande variedade de técnicas, que incluem tanto sistemas de controlo ativo de força como de controlo passivo. Os sistemas de controlo passivo têm um custo inferior devido à sua simplicidade, mas não têm a precisão necessária para trabalhos de acabamento superficial, sendo apenas utilizados para remoção de rebarbas grosseiras, e como tal não serão um foco de estudo [19].

Esse foco será dado aos sistemas de controlo ativo de força. Esses sistemas medem em permanência a força aplicada (*output*) e comparam o *feedback* (força real medida com uma célula de carga) com uma referência predefinida. Na figura 2.4 pode ver-se uma representação básica destes sistemas.

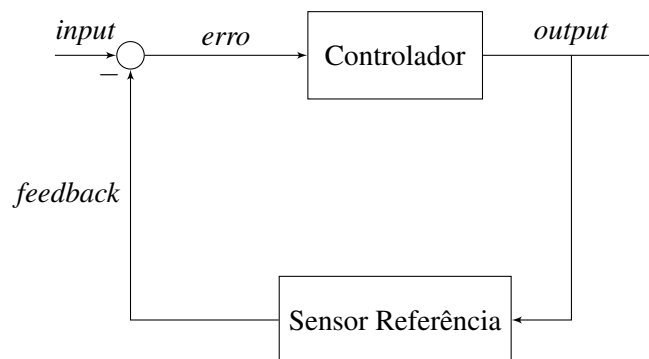


Figura 2.4: Representação básica de um sistema de controlo ativo de força

Como já referido anteriormente, a variável principal deste processo é o valor da força aplicada, que deve ser mantida num determinado valor para obter o acabamento desejado. Este valor é predeterminado e obtido experimentalmente. Quando esse valor é conhecido, é inserido no controlador e, subtraindo a força real, retira-se um sinal de erro. Esse sinal é enviado para o controlador, que ajusta o valor da força aplicada até o erro ser zero [19].

Dentro destes sistemas de controlo ativo, existem dois grandes grupos de dispositivos: os *through-the-arm* e os *around-the-arm*. Em seguida, serão descritos os dois tipos de sistemas, algumas características e também vantagens e desvantagens de cada um [20].

2.3.1 *Through-the-Arm Force Control*

Estes dispositivos são definidos pela montagem de um transdutor de força/binário no último eixo do robô. Nestes sistemas, tanto a posição como a força aplicada são definidas pelo robô. O *feedback* e o erro são redirecionados para o controlador do robô e as compensações têm de ser feitas pelo mesmo e em conjunto com os movimentos de trajetória predefinidos. Este método funciona bem com peças pouco rígidas, mas o trabalho num meio desse género leva a uma menor sensibilidade a erros posicionais. A complacência dos sistemas robóticos em si é baixa, porque é necessária uma certa rigidez para se ter a precisão posicional necessária.

As limitações deste método fazem-se notar quando se passa para um meio mais rígido. Nestas condições a precisão posicional é crítica devido a uma maior rigidez total do sistema.

Por exemplo, tendo uma rigidez de 90 kN/m, um valor normal para um braço robótico, um desfasamento de apenas 0.3 mm leva a uma variação de força de 27 N, que pode ser suficiente para danificar gravemente a peça [21].

Este desfasamento é devido à incapacidade do robô em responder suficientemente rápido a variações bruscas de geometria, por causa da sua massa e binário finito dos seus atuadores. Existindo uma diminuição da velocidade de translação da ferramenta, é possível diminuir o efeito de variação de força, de modo a conseguir resultados satisfatórios.

Concluindo, o controlo *Through-the-Arm* é útil em aplicações de baixa velocidade, com meios/peças pouco rígidos e com peças de geometria simples.

2.3.2 *Around-the-Arm Force Control*

Nestes sistemas robóticos, existe uma separação dos movimentos de posicionamento e de aplicação de força. Neste caso, o robô apenas serve para o posicionamento e movimento da ferramenta, enquanto que o controlo de força é feito através da adição de um atuador específico para esse efeito. Este adiciona então um eixo motriz, de rotação ou de translação.

Estes atuadores têm um curso entre 5 e 100 mm ou um curso radial de $\pm 5^\circ$. Tendo apenas a função de aplicar a força predefinida na peça, têm uma capacidade de reação ao erro muito mais elevada que os sistemas *Through-the-Arm* [20].

O método de atuação mais utilizado nas soluções existentes é a atuação pneumática, em detrimento de outros como a hidráulica ou mecânica. Isto é devido ao baixo rácio peso/força e à inerente complacência do sistema com origem na compressibilidade do ar. Outros benefícios incluem o baixo custo e a disponibilidade e existência de ar comprimido no ambiente industrial.

A força gravítica tem um impacto significativo neste tipo de sistema e tem de ser compensada, especialmente se estiver planeado inverter a ferramenta, aumentando a magnitude da força aplicada no atuador, como apresentado na figura 2.5.

Tendo em conta todos os factores, é a solução mais indicada para trabalhos com tolerâncias muito curtas, como o polimento de peças rígidas.

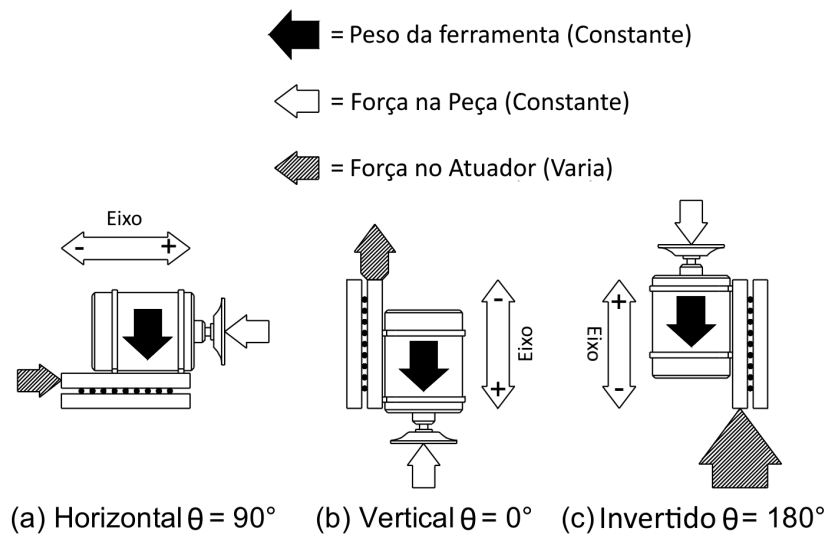


Figura 2.5: Impacto das forças gravíticas [20].

2.4 Células Robóticas

2.4.1 Introdução

Este subcapítulo irá focar na implementação de células robóticas, tratando-se da programação dos robôs em si e da segurança inerente a estas células.

2.4.2 Layout de uma célula robotizada

Tipicamente, o conceito de célula robotizada subentende a presença de mais que um elemento. Esses elementos geralmente compreendem um robô e respetivo controlador, uma ferramenta transportada pelo robô (ou fixa), um sistema de posicionamento, eventualmente um sistema de alimentação/remoção dos produtos e mecanismos de segurança. A célula robotizada que se pretende implementar nesta dissertação compreende apenas os sistemas básicos: o robô e respetivo controlador, ferramenta e sistema de posicionamento.

De um modo geral, uma célula robótica pode apresentar dois tipos de configuração: robô centrado na célula (Figura 2.6) ou robô em série com o sistema de transporte. No primeiro caso, o robô encontra-se posicionado no centro da célula com os restantes equipamentos dispostos em seu redor. No caso de o robô estar em série com o sistema de transporte (Figura 2.7), como o próprio nome indica, o robô está disposto de forma alinhada com os sistemas de transferência de produtos.



Figura 2.6: *Layout* típico de célula robótica com robô centrado [22].



Figura 2.7: *Layout* típico de célula robótica com robô em série [23].

2.4.3 Programação de Robôs

Uma solução robotizada representa normalmente uma excelente solução de produtividade e flexibilidade. No entanto, a complexidade da programação de um robô para uma aplicação específica ainda é muito elevada, e abarca um custo elevado [24].

Um robô industrial, sendo projetado para movimentar ferramentas e peças ao longo de trajetórias pré-estabelecidas, requer que estas sejam "ensinadas", assim como o posicionamento e orientação da ferramenta em si, de modo a garantir um percurso coerente com a finalidade. Esta programação pode ser feita através de dois métodos distintos, *online* e *offline*. Ambas as estratégias apresentam vantagens e desvantagens, fazendo com que certas aplicações sejam mais ou menos adequadas a cada método. Em seguida, são apresentados os métodos de programação referidos anteriormente.

2.4.3.1 Programação *online*

Programar um robô *online* implica o seu guiamento pelo operador ao longo da trajetória pretendida, gravando pontos específicos no controlador do mesmo. Com estes pontos, é possível definir os percursos que se quer que o robô percorra. O movimento do robô é da responsabilidade do operador, sendo então importante garantir que não ocorrerão colisões nessas movimentações em vazio [24].

Existem dois modos de realizar a programação *online*: através de guiamento direto, onde o robô é movido diretamente pelo operador no percurso desejado, ou via uma consola de programação, onde o operador tem possibilidade de controlar o robô à distância.

Apesar da aparente simplicidade, este método apresenta alguns inconvenientes:

- É um processo longo e complicado, situação agravada para peças de geometria complexa;
- É necessário uma repetição integral do processo mesmo para peças com pequenas variações;
- É necessário realizar um grande número de testes antes de o programa ser satisfatório e fiável;
- Quando o robô está a ser ensinado não pode ser usado para produção;
- Existe um risco elevado para o operador durante a programação, estando sujeito a ambientes adversos;
- É inadequado para tarefas que exigem maior rigor geométrico.

No que diz respeito a operações de maquinagem, este processo de programação não é apropriado. Adicionalmente, para a maquinagem do interior de peças, torna-se complexa a definição dos contornos e profundidade de penetração da ferramenta.

2.4.3.2 Programação *offline*

A programação *offline* consiste em criar e simular programas para o robô usando softwares adequados para esta finalidade. Este método é bastante utilizado em sistemas de produção em grande escala. O utilizador pode testar o alcance, colisões e ajustar parâmetros relacionados com o movimento do robô antes de descarregar o programa para o mesmo.

É um procedimento mais complexo que o anterior, pois, para além de ser necessário definir os pontos a serem alcançados pelo robô (*targets*) e respetiva configuração, é necessário planear a trajetória e otimizar o processo [24].

As vantagens deste processo em relação à programação *online* são:

- Existe uma minimização do tempo de não produção e há uma eliminação do perigo associado à permanência em ambientes potencialmente perigosos;
- Há uma maior flexibilidade dos programas, onde se pode efetuar alterações pontuais sem ser necessário refazer todo o programa;
- É possível confirmar os movimentos do robô e há uma minimização das probabilidades de erro devido à simulação, que leva a um aumento da produtividade e segurança.

No entanto, este método também apresenta limitações e problemas, tais como [25]:

- Existência de erros de tradução/interpretação da linguagem de programação do software de simulação para o robô;
- Possibilidade de ter erros de modelização cinemática, dinâmica, do ambiente de trabalho e dos processos a simular;
- Necessidade de calibrar os programas gerados.

Esta é uma técnica viável apenas para empresas com elevados volumes de produção, visto acarretar mais custos de software e mais tempo despendido para desenvolver programas para aplicações específicas e por requerer técnicos com conhecimentos avançados de programação.

2.4.4 Segurança

A norma ISO 12100:2010 [26] apresenta o enquadramento e orientações para o projeto de uma solução de segurança para a generalidade das máquinas. É dividida em duas partes principais, a avaliação dos riscos, ou *risk assessment*, e a sua redução.

Em primeiro lugar, deve ser realizado o exercício da avaliação dos riscos, começando com a especificação dos limites de uso e com os limites espaciais e temporais da máquina, seguindo-se a identificação dos perigos existentes.

De seguida, é feita a estimativa dos riscos inerentes a cada perigo e situação perigosa identificados, quantificando-os segundo uma ou mais metodologias de estimativa de risco e, por fim, é feita a avaliação do risco, que dita a necessidade de medidas de redução do risco ou o término de todo o processo.

A redução do risco é feita seguindo uma metodologia de três etapas. A primeira etapa consiste na remoção, se possível, do risco por medidas de prevenção intrínsecas. Todavia, na impossibilidade da sua eliminação, é feita a sua redução, recorrendo a modificações na conceção da máquina.

Inicia-se a segunda etapa caso os riscos residuais da primeira sejam demasiado acentuados. Assim, a redução do risco passa pela implementação de medidas e dispositivos de proteção adequados.

Caso, após a segunda etapa, existam, ainda, riscos residuais, estes devem constar nas informações para a utilização da máquina, sendo esta a terceira etapa do processo de redução de risco. Este processo é apresentado, graficamente, pela figura 2.8.

Todo este processo é iterativo, ou seja, sempre que é tomada uma medida de redução de risco, o exercício de avaliação dos riscos deve ser refeito para avaliar se este passou a ser tolerável e/ou se foram gerados novos riscos e se os limites podem ser especificados de novo.

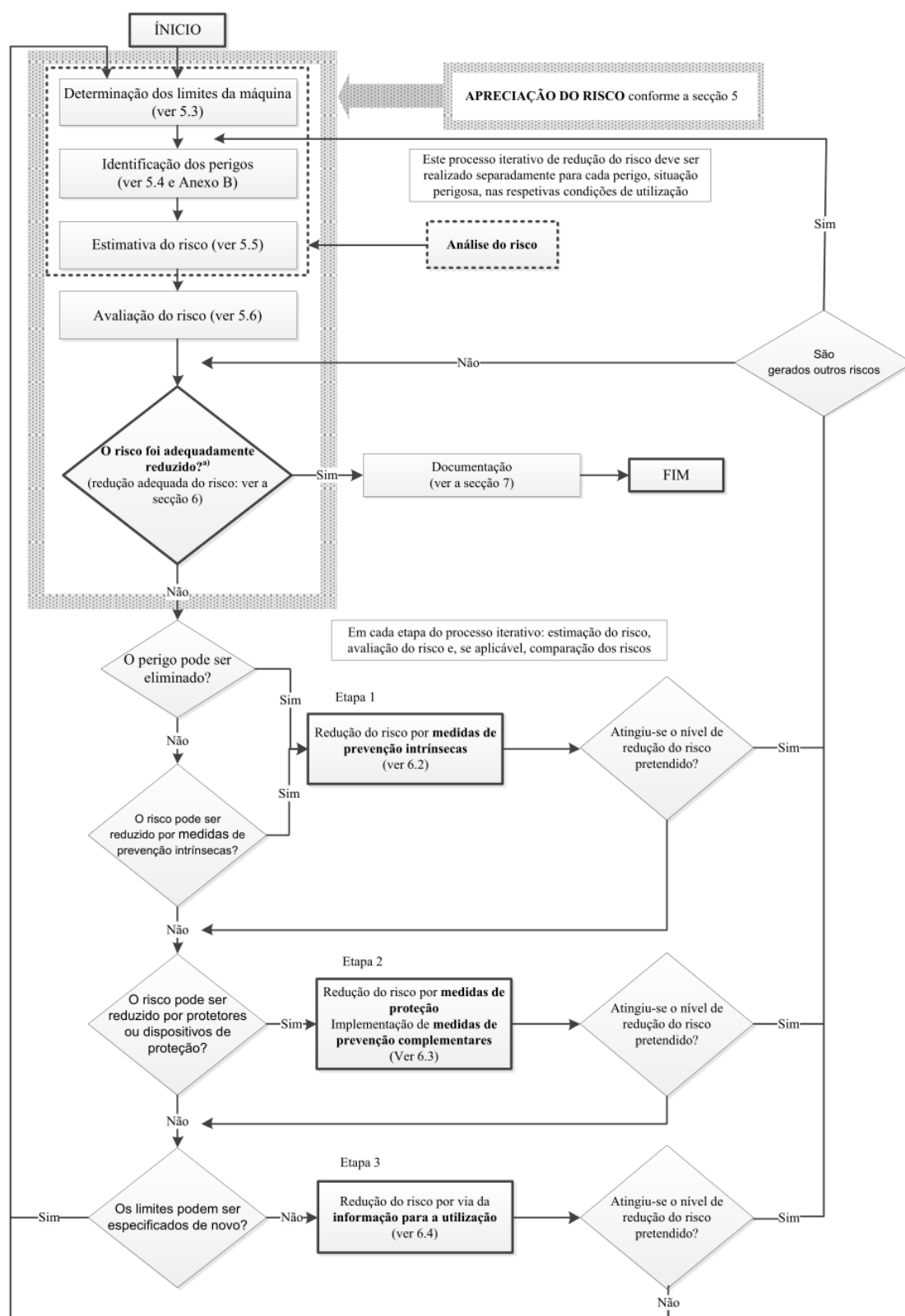


Figura 2.8: Representação esquemática do processo de redução do risco, incluindo o método iterativo das três etapas

2.4.4.1 *Risk assesment* - Avaliação dos riscos

Como já referido anteriormente, a avaliação dos riscos é um processo iterativo e deve ser efetuado nas diversas fases do ciclo de vida de uma máquina, desde a sua conceção ao seu fim de vida (desmantelamento).

Para se poder fazer uma boa avaliação, deve ter-se acesso a:

- Especificações do utilizador;
- Normas, diretivas e outros documentos técnicos relevantes;
- Princípios de ergonomia;
- Informação sobre a máquina:
 - Desenhos técnicos dos equipamentos;
 - Fontes de energia utilizadas;
 - Várias fases do ciclo de vida;
 - Documentação sobre modelos similares;
 - Informações de utilização (caso existam);
- Relatos de experiências anteriores.

Estas informações devem ser sempre atualizadas quando ocorrem mudanças ou modificações, ou novos desenvolvimentos.

Não estando esta avaliação de riscos de segurança no propósito desta dissertação, é ainda de grande importância referir e chamar a atenção para este tema.

Capítulo 3

Conceção e Implementação de uma Célula Robotizada para Polimento

Neste capítulo são fornecidos, com os devidos detalhes, os procedimentos de concepção e implementação da célula robótica. Apresentam-se, também, algumas soluções de células robotizadas de diferentes sectores industriais que são aplicadas em operações de polimento. Também são comentadas algumas dificuldades encontradas durante o processo de escolha e decisão do percurso escolhido, tendo como exemplo o sistema de controlo de força, e por fim são expostas as soluções encontradas para alcançar os objetivos do trabalho.

3.1 Definição do problema

Recentemente, a TCCWHITESTONE tem tido um aumento significativo no seu volume de negócios e, para acompanhar esse aumento, necessita de atualizar e melhorar os seus processos de fabrico. Alguns avanços têm sido feitos, como o *upgrade* e substituição de máquinas CNC, mas o processo de atualização é contínuo e não pode estagnar. Assim, foi decidido que o foco deveria estar numa área de produção com perspectiva de melhorias significativas, sendo ela o polimento de peças semi-acabadas.

Isso, aliado ao desejo de conseguir o polimento de peças orgânicas e com formatos tridimensionais com uma maior uniformidade, levou a empresa a pensar na automatização deste processo.

Deste modo, foi tomada a decisão de investir na robotização dessa área, implementando uma célula robótica para polimento de peças.

3.2 Objetivos do projeto

O principal objetivo desta dissertação é a concepção e implementação de uma célula robótica dedicada a operações de polimento de peças feitas em mármore. Para o efeito, foram estudadas diferentes soluções para os diversos passos desta implementação. Pretende-se comparar potenciais opções para as várias partes integrantes da célula, criar as várias partes que compõem uma célula

robótica, e avaliar tanto a solução como o *software* quanto à sua aplicabilidade neste tipo de operações e à capacidade de satisfazer os requisitos impostos pela empresa, atendendo aos recursos disponibilizados.

Esta dissertação é realizada em parceria com a empresa TCCWHITESTONE, especializada no *design*, conceção e fabrico de peças feitas em mármore. A empresa tem o intuito de substituir os operadores existentes na área do polimento, tentando no entanto melhorar a produtividade e diminuir o tempo necessário para polir cada peça.

3.3 Análise de soluções existentes

Em seguida apresentam-se algumas soluções de células robotizadas de diferentes sectores industriais, aplicadas em operações de polimento e com diferentes tipos de controlo.

3.3.1 SandRob

Empresa: Dallara

Sector: Automóvel

Principal produto: Peças em fibra de carbono

Operação: Polimento, trimming e *waterjet*

Controlo: em força ativo, na ferramenta (adaptando a velocidade e trajectória de acordo com a informação da força de contacto).

Esta solução utilizada pela Dallara é constituída por um robô ABB IRB 4600-40 equipado com uma ferramenta com controlo ativo de força proprietária da Roboticom, empresa que fornece a célula. O dispositivo de fixação das peças contém um eixo auxiliar e tem a capacidade para mais do que uma peça (uma em trabalho). A célula contém ainda um sistema de calibração por ponta de prova e um software de programação *off-line* desenvolvido pela Roboticom, o ARPP (figura 3.2).



Figura 3.1: Célula SandRob [27].

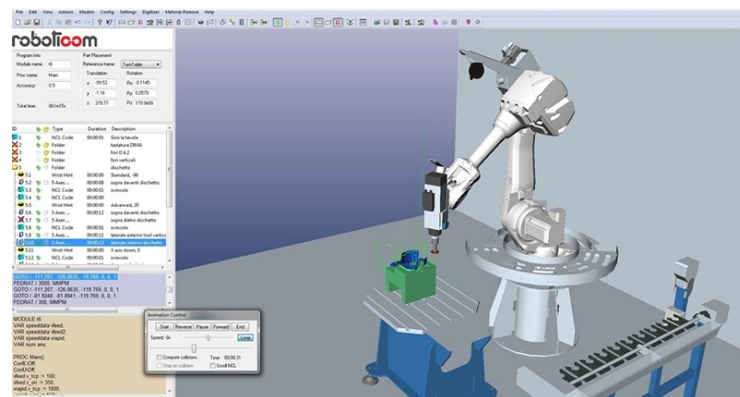


Figura 3.2: Software ARPP [28].

3.3.2 SMARTFinish

Empresa: Inovision

Sector: Automóvel

Principal produto: Portas e outras peças da carroçaria

Operação: Polimento a seco

Controlo: em força ativo, de velocidade na ferramenta (adaptando a velocidade e trajectória de acordo com as informações do sistema de controlo de força).

Esta solução para polimento industrial pode ser composta por vários elementos, como robôs FANUC M-20 (visível na figura 3.3), M-710, Kawasaki (Série R) ou até mesmo com robôs colaborativos guiados à mão. Estes são acoplados a equipamentos padrão como o sistema ACF da FerRobotics ou eixos PushCorp, polidoras orbitais elétricas e sistemas de mudança de abrasivo automático da ASIS, criando um sistema 100% automatizado de polimento.



Figura 3.3: Célula SMARTFinish [29].

3.4 Processo de escolha do Software

Sendo o *software* uma parte tão integrante do projeto em si, a sua escolha é também de igual importância. Este subcapítulo irá focar-se nesse processo de escolha e nas diferentes opções estudadas.

A ordenação dos vários capítulos da implementação indica uma ordem cronológica mas, atendendo à multidisciplinaridade do projeto, o trabalho foi sendo desenvolvido em diferentes frentes simultaneamente.

Em primeiro lugar, será feita uma breve descrição dos vários *softwares* tidos em conta, e em seguida é feita uma análise comparativa.

3.4.1 Sprutcam 12

Atualmente, o Sprutcam 12 é a mais recente aposta da empresa SPRUT Technology, sediada em Naberezhnye Chelny, Rússia. O Sprutcam 12 é um *software* CAM que disponibiliza pós-processadores para diversas máquinas-ferramenta e para robôs industriais. As principais funcionalidades na utilização deste *software* são descritas de seguida, e é apresentada na Figura 3.4 a interface do mesmo.

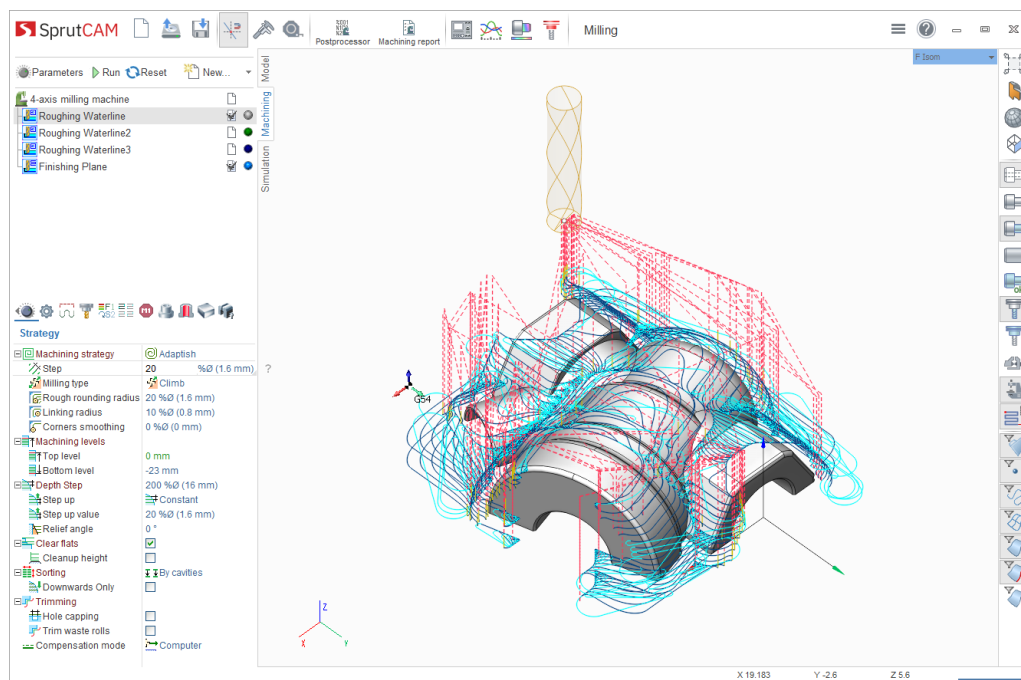


Figura 3.4: Interface Sprutcam [30].

- Importação de modelos gerados em vários *softwares* CAD e em diferentes formatos;
- Capacidade de usar e criar diferentes robôs e ferramentas;
- Parametrização detalhada dos programas de maquinagem e das ferramentas em si;
- Simulação do programa gerado em ambiente virtual;
- Detecção de colisões;
- Edição e configuração de pós-processadores;
- Gestão da biblioteca de ferramentas.

3.4.2 Robotmaster V7

O Robotmaster é uma aplicação dedicada à programação de robôs industriais que disponibiliza diversos pós-processadores que permitem programar robôs de vários fabricantes. O uso deste *software* permite ao utilizador definir vários parâmetros e usufruir de diversas funcionalidades, nomeadamente:

- Geração de código para o robô simples e *user-friendly*;
- Simulação e validação dos programas gerados;
- Possibilidade de otimização dos parâmetros da ferramenta;
- Importação de tarefas de uma forma *brand-neutral*, possibilitando a coexistência de robôs e acessórios de marcas diferentes;
- Visualização do *workspace*;
- Sistema de correção de erros muito poderoso, mas com uma interface complicada;
- Bom controlo da trajetória do robô.

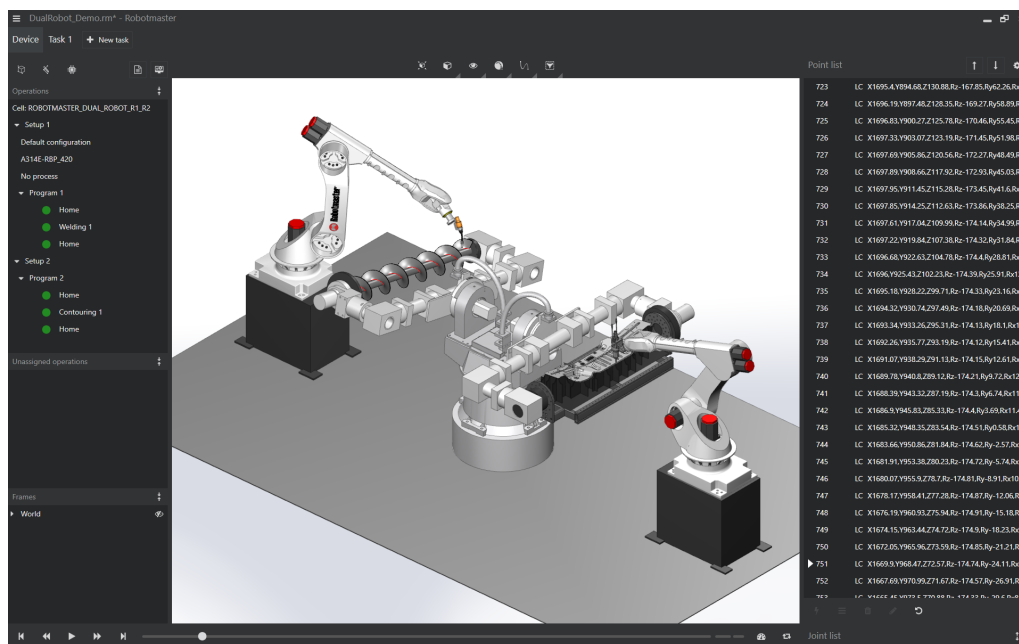


Figura 3.5: Interface Robotmaster [31].

3.4.3 OCTOPUZ

O OCTOPUZ é um *software* de programação e simulação offline robusto, projetado para simplificar a automação industrial avançada. Tem uma forte componente visual, que permite uma simplificação grande dos processos. Algumas das suas propriedades são:

- Método de importação simples - direto do *desktop*;
- Simulação e alteração/correção de erros ao vivo;
- *Software* intuitivo - Biblioteca *drag-and-drop* ;
- Simulação do programa gerado em ambiente virtual;
- Programa de análise e correção de erros gráfico e intuitivo (visível na figura 3.7).

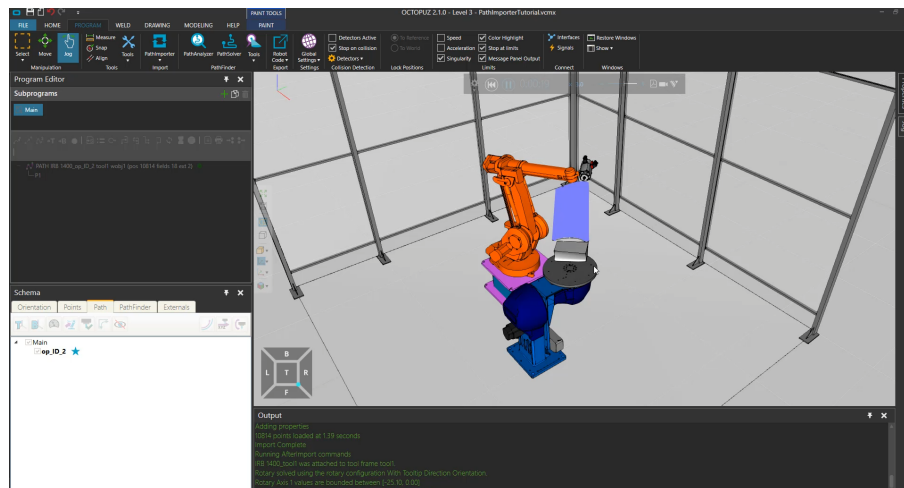


Figura 3.6: Interface OCTOPUZ [32].

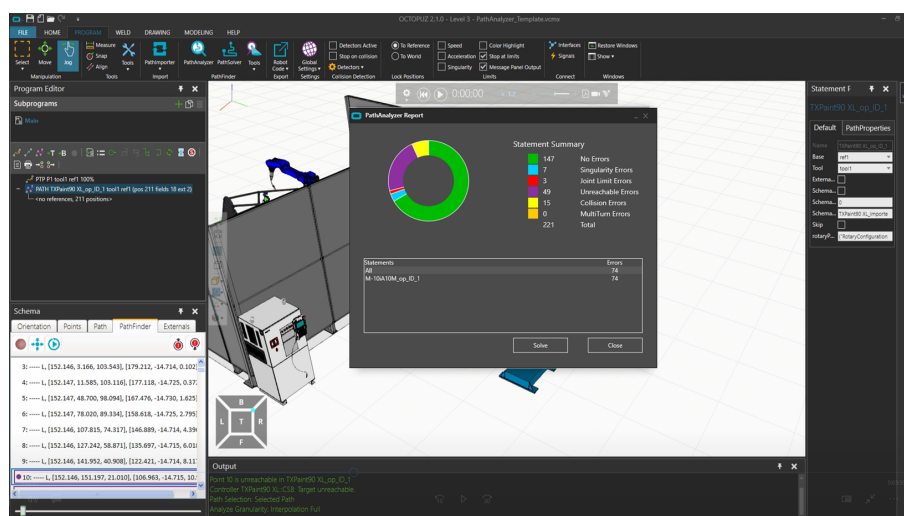


Figura 3.7: Relatório do *PathAnalyser* [32].

3.4.4 PowerMill

O PowerMill é um *software* 3D CAM para fabricação aditiva e subtrativa, muito conhecido e utilizado. Além das várias funcionalidades comuns a *softwares* deste tipo, apresenta algumas particularidades que permitem e auxiliam a criação de programas de maquinagem, incluindo:

- Definição da estratégia de maquinagem a usar aquando da geração da trajetória (*zigzag*, *espiral*, *peano*, *lissajous*, etc.);
- Resolução de erros de percurso de forma interativa ou automática;
- Atualização dinâmica do percurso de maquinagem;
- Interface simples e intuitiva - em linha com outros *softwares* Autodesk;
- Importação de geometrias e ferramentas proveniente de vários *softwares* de modelação;
- Parametrização e ajuste da posição da ferramenta detalhado (visível na figura 3.9).

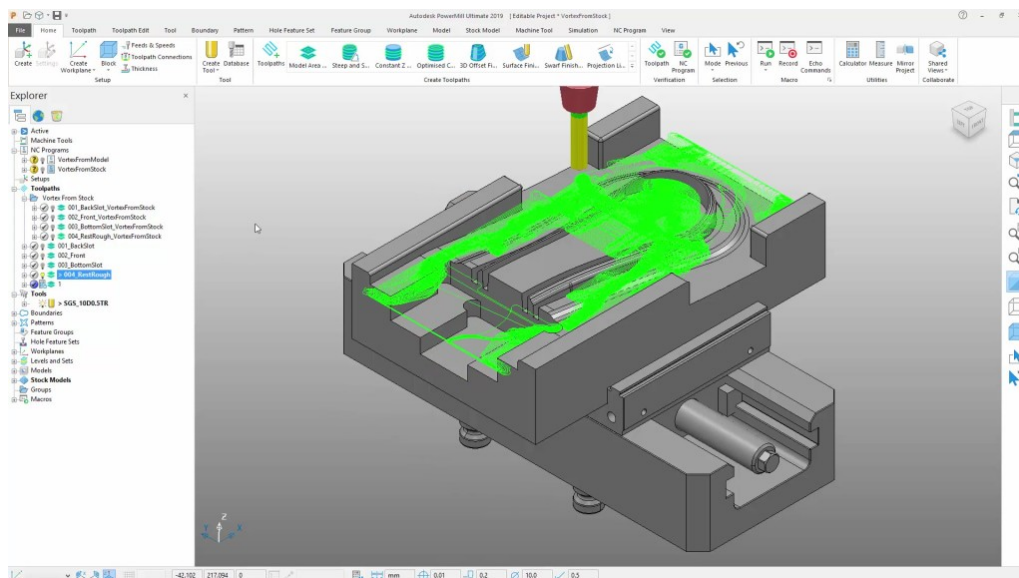


Figura 3.8: Interface PowerMill [33].

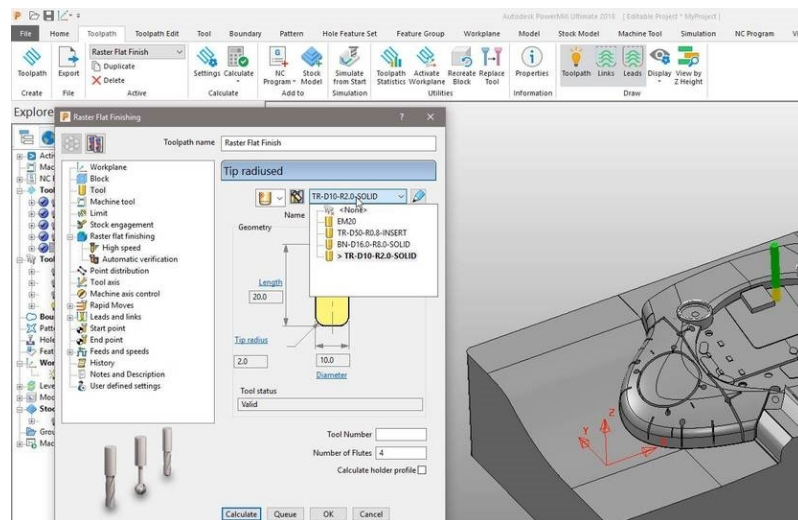


Figura 3.9: Detalhe da parametrização de ferramentas [34].

3.4.5 Análise Comparativa

Com base na informação disponível referente a cada *software* e após a utilização dos mesmos, é possível identificar as principais forças e debilidades que cada aplicação informática tem, e também comparar essas particularidades para chegar a uma conclusão.

Alguns pontos a ter em conta em relação ao Sprutcam são:

- Posicionamento e parametrização de objetos baseados em linha de comandos;
- Processo de importação complicado para pessoas fora do ramo;
- Biblioteca de robôs pouco extensa;
- Criação e exportação de modelos CAD não existente;
- Interface rudimentar, sendo pouco intuitiva.

O programa OCTOPUZ também tem algumas desvantagens, como a necessidade de criar *toolpaths* noutro CAM, para depois importar para o OCTOPUZ, ou seja, o programa não tem a capacidade de criar percursos de peças, apenas permite seguir arestas, para operações de rebarbagem, soldadura, *trimming*, etc.

Depois de alguma pesquisa, foi possível notar que o *software* PowerMill traz algumas vantagens para este projeto, e é *future-proof* em relação a outros projetos da empresa, o que pode pesar na decisão final. Uma dessas vantagens é a possibilidade de sincronização do *software* com pontas de prova.

No geral, o programa RobotMaster tem qualidade, mas o facto da implementação robótica não ser apenas industrial leva a um menor detalhe e preparação para algumas tarefas mais específicas que possam ser propostas.

A escolha do *software* não depende apenas de detalhes técnicos, tendo também muita importância comparar outros aspetos, como o preço e o apoio e manutenção técnica.

Da experiência ganha com o uso dos *softwares*, e relacionando isso com as várias reuniões tidas com os representantes de cada programa, foi possível resumir estes detalhes, presentes na tabela 3.1, que tem uma escala qualitativa de ★ a ★★★★★★.

Tabela 3.1: Análise Comparativa de aspetos não-técnicos

	Sprutcam	RobotMaster	Octopuz	PowerMill
Apoio técnico	★	★★★★★	★★★	★★★★★★
Preço	★★★★★★	★★★☆☆*	★	★★★★★

(* - A criação de um *plug-in* para importar ficheiros do CAM utilizado atualmente na empresa incorre em custos extra.)

3.4.6 Conclusão

Tendo em conta o conhecimento adquirido e os resultados da tabela 3.1, é possível determinar que o *software* que tem melhor relação preço/qualidade, verificando-se o melhor apoio técnico, é o PowerMill, sendo este o programa que poderá ter maior valor acrescentado, não só neste projeto como, também em projetos futuros.

Assim sendo, é o PowerMill o *software* escolhido, tendo sido aprovado pela empresa.

3.5 Escolha do sistema AFC (Active Force Control)

O processo de escolha do sistema de controlo ativo de força recai no cumprimento dos seguintes requisitos:

1. *Payload* mínimo de 20 kg;
 - O AFC tem que suportar a ferramenta nos seus movimentos enquanto segue as trajetórias.
2. Resolução de 2.5 N;
 - Este requisito é referente à mínima variação de força que o AFC consegue fazer.
3. Certificação **IP54** ou superior;
 - A tabela de grau de proteção IP é um padrão internacional definido pela norma ISO 20653, e pode ser consultada no anexo B.
4. Curso mínimo de 15 mm;
 - A capacidade de complacência e de se adaptar a geometrias mais complexas depende deste requisito.
5. *Time-frame* de atualização do sensor de pelo menos 10 ms.
 - É necessária uma rápida resposta a variações de geometria, e essa celeridade depende do tempo que demora cada atualização do sensor de força.

Em seguida apresentam-se algumas opções consideradas para o sistema AFC.

3.5.1 ATI Compliance Device Model U1-050

Este dispositivo, designado por *Universal Compliance Compensator*, é um sistema que fornece complacência lateral em X-Y, rotacional em X-Y-Z e de compressão em Z, permitindo que o robô supere um desalinhamento grave entre a ferramenta e a peça de trabalho. É possível ajustar a sua rigidez através da variação do *input* de pressão pneumática no pistão de *reset*, e a rigidez do sistema pode ser ajustada para cada aplicação ou *payload*. Dispõe de um padrão de montagem ISO para conexão direta a vários robôs, sem a necessidade de adaptadores, e permite configurações flexíveis, através de padrões de ligação PNP ou NPN e uma manga de borracha para proteção do exterior, por exemplo.

Esta solução possui capacidades que possivelmente estarão subaproveitadas na maior parte dos processos produtivos, tornando-se muitas vezes redundante medir forças em mais do que uma direção.



Figura 3.10: ATI U1-050 [35].

3.5.2 PushCorp AFD1100

Um outro sistema de controlo ativo de força é o AFD1100 fornecido pela PushCorp Inc. (figura 3.11).

No entanto, o funcionamento deste sistema é bastante diferente do anterior, uma vez que é dependente de um controlador externo e só controla força numa só direção. Essa direção depende do modo de montagem do aparelho na extremidade do robô. Este sistema é independente do robô, realizando o controlo de força apenas na ferramenta.

Tem uma construção extremamente robusta, e é utilizado em operações de polimento, retificação e qualquer outro processo que exija uma aplicação de força precisa e continuamente ajustável.

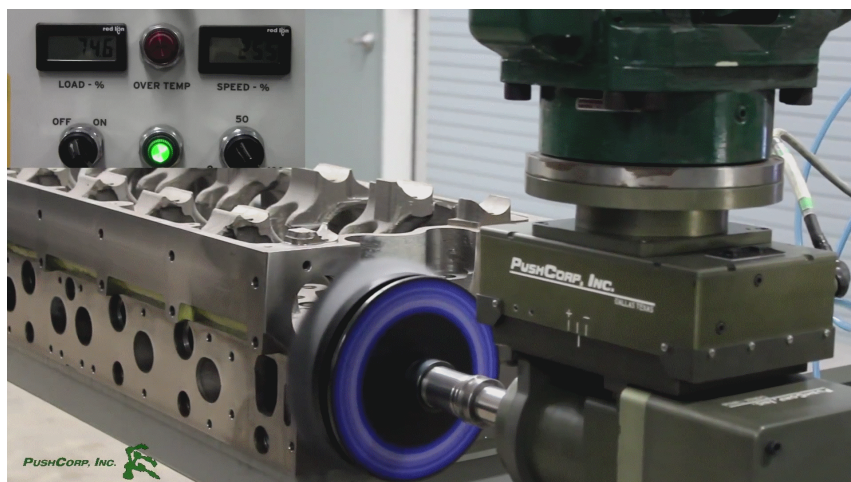


Figura 3.11: PushCorp AFD1100 [36].

3.5.3 FerRobotics ACF HD

O dispositivo de controlo de força ACF HD combina tecnologia de ponta no ramo da complacência para criar um dispositivo universalmente aplicável. Esta tecnologia é capaz de automatizar tanto operações sensíveis ao contacto, como aplicações com diversos níveis de tolerância.

Tem um funcionamento semelhante ao do sistema anterior, controlando força numa só direção. A sua forma é ergonómica e funciona como uma extensão do último eixo do robô.

Uma vantagem deste dispositivo é a compensação de gravidade integrada, onde a força aplicada no processo se mantém constante mesmo com alteração da orientação do movimento.



Figura 3.12: FerRobotics ACF HD [37].

3.5.4 Cumprimento dos requisitos

Da pesquisa e leitura dos *datasheets* dos sistemas mencionados, e relacionando essa informação com a obtida através de reuniões e *e-mails* com representantes e integradores dos dispositivos, foi possível retirar a informação resumida na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Cumprimento dos requisitos propostos [35][38][37].

Requisito	ATI U1-050	PushCorp AFD1100	FerRobotics ACF HD
1.	4.99 kg	36-91 kg*	25-60 kg*
2.	N/A**	0.8 N	0.75 N
3.	N/A***	N/A	IP65
4.	6.1 mm	40 mm	35.5-98 mm*
5.	N/A**	2 ms	2 ms

(* - Dependente do sub-modelo.)

(** - A regulação da rigidez do sistema não é automática.)

(*** - A manga de proteção deverá dar alguma proteção, mas não é certificada.)

Desta tabela pode-se retirar que a escolha mais acertada pode passar pelo sistema ACF da FerRobotics, devido a ser o único que cumpre todos os requisitos de funcionamento.

A protecção de ameaças do exterior é muito importante no processo de polimento de peças em mármore, porque existe uma grande quantidade de poeira fina e de água no ambiente próximo do dispositivo.

3.6 Escolha do sistema de troca rápida de ferramenta

Um sistema de troca rápida de ferramenta é um dispositivo que é fixado no robô e permite que a célula robótica alterne de uma ferramenta para outra. Isto significa que se pode ter várias ferramentas numa mesma área para concluir um conjunto específico de tarefas. Por exemplo, se uma operação exigir a passagem de discos abrasivos de diferentes tamanhos de grão, o sistema de troca rápida de ferramenta pode usar cada ferramenta individualmente e alterná-las uma após a outra para concluir as tarefas necessárias.

Foram dadas duas opções para este sistema de encaixe rápido. Em seguida irá ser dado mais detalhe a cada uma delas.

3.6.1 ATI QC-22

A ATI é a maior fabricante de sistemas de troca de ferramenta a nível mundial. Com sistemas de carga útil máxima desde 1.4 kg a 4080 kg, quase todas as aplicações existentes que necessitem de algum tipo de sistema de encaixe rápido podem ser solucionadas com um sistema ATI. A ATI usa sistemas que trabalham apenas com atuação pneumática, embora geralmente fluidos ou

cabos elétricos possam ser alimentados ou passados através do sistema, com recurso a módulos adicionais.

Para a aplicação em questão, o modelo sugerido foi um modelo com um *payload* de 50 kg, porque é o primeiro que permite a aplicação do módulo de passagem de fluidos, necessário para ligar à entrada de água da polidora.

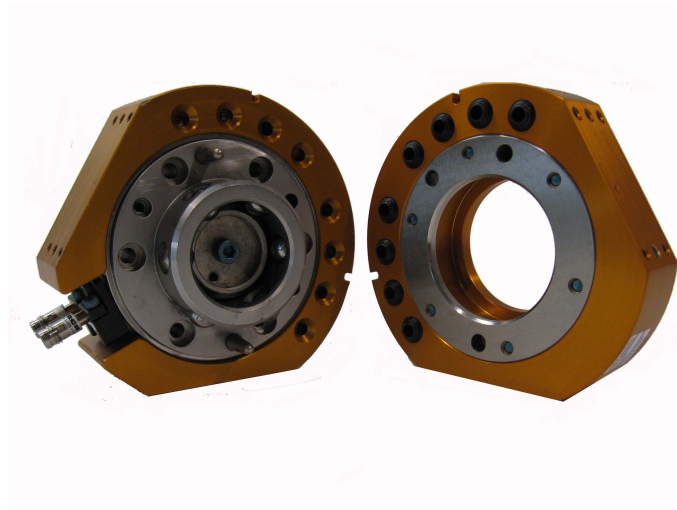


Figura 3.13: ATI QC-22, [39].

Tabela 3.3: Especificações do sistema ATI QC-22, [39].

Payload máximo [kg]	50
Binário suportado (x,y) [Nm]	157
Binário suportado (z) [Nm]	216
Força de aperto [N]	4500
Repetibilidade [mm]	0.0152
Folga máxima de encaixe [mm]	3
Peso [kg]	1.7

3.6.2 SCHUNK SWS-041

O uso dos sistemas de troca de ferramenta para robôs aumenta a versatilidade, a eficiência e o tempo de ciclo do processo da sua aplicação. A SCHUNK oferece um dos mais completos portfólios de componentes para aplicações robóticas desde pequenos componentes até ao manuseamento de cargas pesadas. Enquanto um operador poderia levar entre cinco a dez minutos para re-equipar manualmente uma ferramenta com ligações hidráulicas e pneumáticas, um sistema de encaixe rápido como o SCHUNK SWS-041 pode reduzir o tempo para este procedimento em poucos segundos, com o processo de apenas travar e destravar a demorar uma questão de milissegundos.

Como na ATI, o modelo com um *payload* de 50 kg é o primeiro que permite a aplicação do módulo de passagem de fluidos, necessário para ligar à entrada de água da polidora, por isso foi também o sugerido.



Figura 3.14: SCHUNK SWS-041, [40].

Tabela 3.4: Especificações do sistema SCHUNK SWS-041, [40].

<i>Payload</i> máximo [kg]	50
Binário suportado (x,y) [Nm]	471
Binário suportado (z) [Nm]	648
Força de aperto [N]	4500
Repetibilidade [mm]	0.015
Folga máxima de encaixe [mm]	3
Peso [kg]	1.4

3.6.3 Análise Comparativa e Conclusão

Como se pode verificar nas tabelas 3.3 e 3.4, existe uma grande semelhança de valores entre os dois modelos a comparar, e ambos cumprem as funções necessárias. Assim, a decisão foi tomada

tendo em conta um parâmetro que não é técnico, tendo sido escolhida a opção mais barata. Assim, foi decidido utilizar o sistema de troca de ferramenta da SCHUNK.

3.7 Design process das peças do EOAT

Neste subcapítulo irão ser apresentados os processos de desenvolvimento das peças integrantes do *End-Of-Arm-Tool* da célula robótica.

A ordem de apresentação das diferentes peças vai ser referente à sua posição em relação ao braço robótico.

3.7.1 Adaptador Braço-AFC

O processo de desenvolvimento desta peça é simples, tal como o seu propósito, sendo apenas um adaptador de padrões de furação entre o braço robótico e o dispositivo de controlo de força.

Nas figuras 3.15 e 3.16 podemos ver os padrões de furação tanto do AFC como do braço robótico.

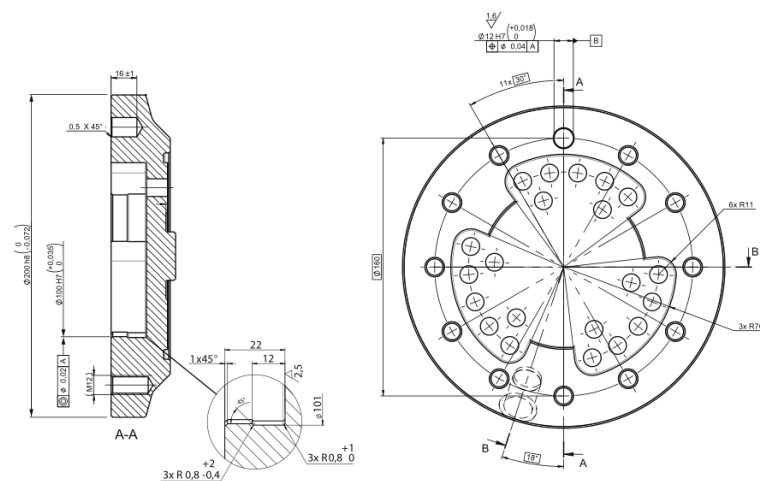


Figura 3.15: Padrão de furação do braço robótico [41].

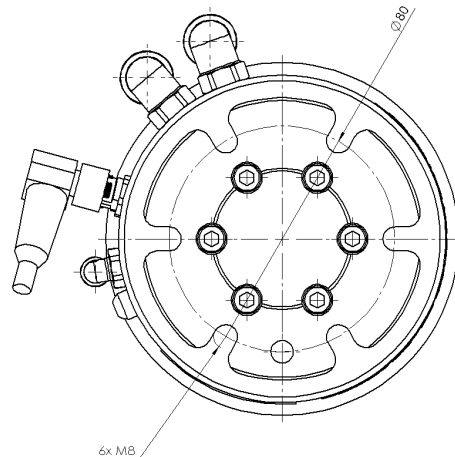


Figura 3.16: Padrão de furação do AFC

Tendo estes padrões de furação como base, a peça foi concebida e fabricada, e está presente na figura 3.17. O desenho técnico desta peça encontra-se no anexo C.

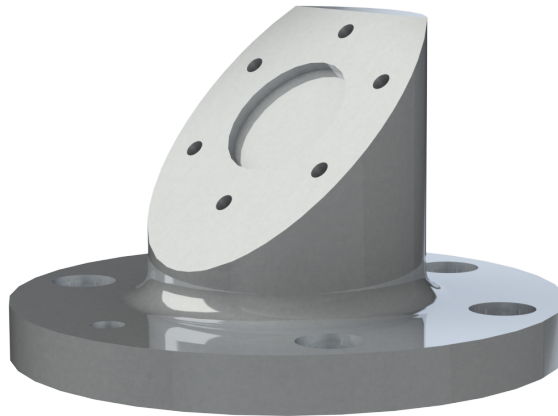
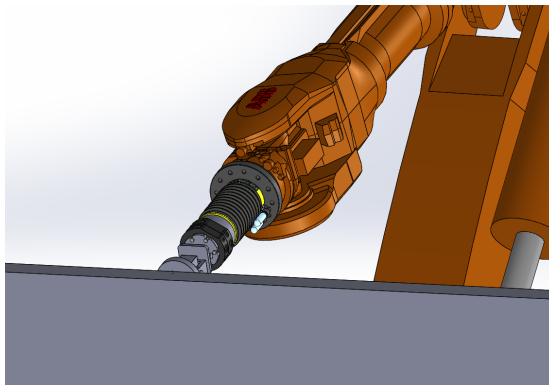


Figura 3.17: Adaptador Braço-AFC

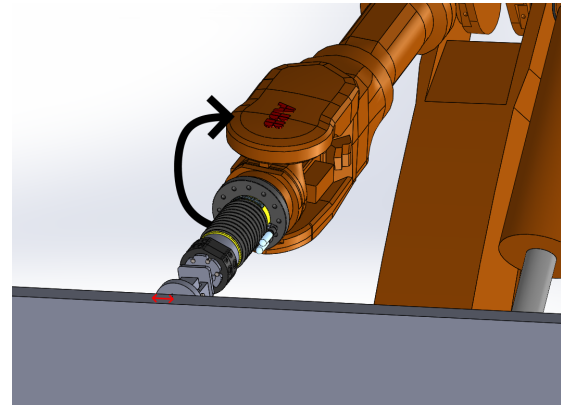
Uma propriedade desta peça é o ângulo de 45° criado entre os planos dos padrões de furação, que tem o propósito de diminuir as singularidades, como está visível na figura seguinte (uma definição de singularidades na robótica está presente no anexo A).

As figuras seguintes demonstram o movimento do robô numa situação de possível singularidade, demonstrada na figura 3.18, sem o uso do adaptador. Como se pode ver na figura 3.19,

a implementação de uma alteração angular no punho do robô, proveniente do ângulo do adaptador, desalinha os eixos 4 e 6 do robô (ver figura A.1), e leva a uma diminuição de situações de singularidade.

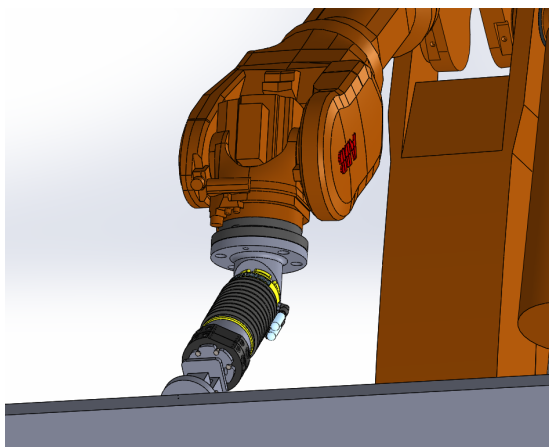


(a) Antes do ponto de inflexão.

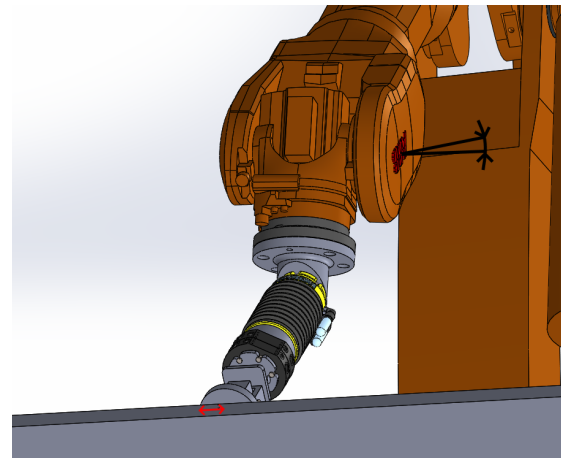


(b) Depois do ponto de inflexão.

Figura 3.18: Robô sem adaptador a 45°



(a) Antes do ponto de inflexão.



(b) Depois do ponto de inflexão.

Figura 3.19: Robô com adaptador a 45°

3.7.2 Adaptador AFC-Troca de ferramenta

Tal como o adaptador anterior, esta peça é simples, pois o seu *design* é feito tendo em vista apenas o seu propósito, que é permitir a ligação entre o AFC e o sistema de troca de ferramenta.

O seu processo de desenvolvimento começa também por analisar os padrões de furação e a localização dos parafusos das peças que vão ser ligadas, estando representados nas figuras 3.20a e 3.20b.

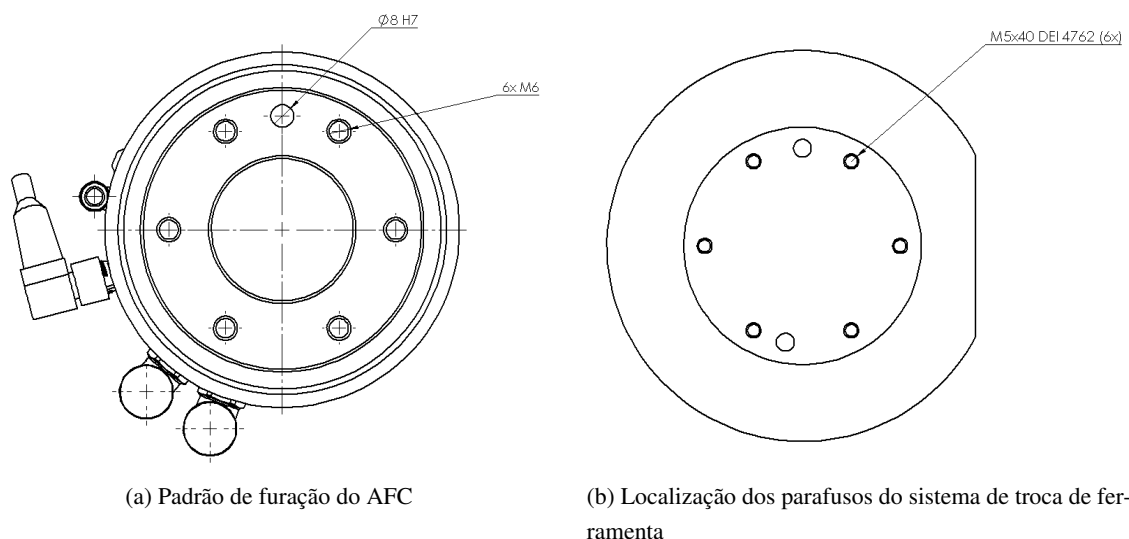


Figura 3.20: Padrões de encaixe mecânico das peças

O passo seguinte é compreender qual será a melhor maneira de acoplar ambas as peças.

Como não irá existir qualquer movimento entre as peças, pensou-se em continuar a forma geral de ambas e criar um adaptador de forma cilíndrica.

Após algumas iterações, devido ao formato da placa de encaixe do sistema de troca de ferramenta, chegou-se a um *design* final, representado abaixo e fabricado com aprovação da empresa. O desenho técnico desta peça encontra-se no anexo D.

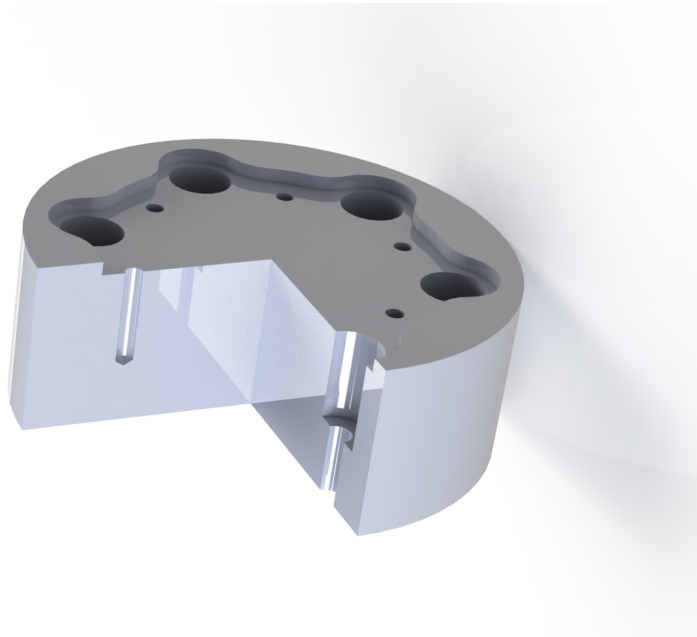


Figura 3.21: Adaptador AFC-Troca de ferramenta



Figura 3.22: Método de acoplamento entre as peças

3.7.3 Suporte da ferramenta de polimento

Sendo esta a peça que faz a ligação entre a ferramenta de polimento e o sistema de troca de ferramenta, o seu processo de desenvolvimento parte da análise da ferramenta de polimento em si. A ferramenta a ser utilizada é uma polidora manual semelhante às já utilizadas pelos operadores da empresa, sendo o modelo SI-2322WR-LE da marca SHINANO.



Figura 3.23: Polidora manual a ser utilizada, [42].

Não sendo possível obter os desenhos técnicos e as dimensões nominais da ferramenta, foi necessário medir a ferramenta em si, tendo para isso sido usado um paquímetro digital. Foi criado um modelo CAD rudimentar para simular a ferramenta, tendo em conta apenas as dimensões mais importantes e o atravancamento da ferramenta. Este modelo está representado na figura 3.24.

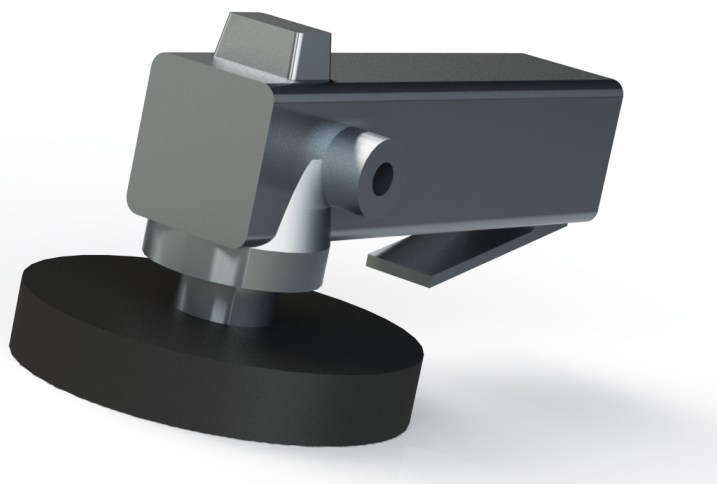


Figura 3.24: Modelo CAD da ferramenta de polimento

A partir deste modelo, foi possível desenvolver um suporte que permite o controlo da ferramenta sem folgas nem movimentos indesejados. Um ponto tido em conta foi a coaxialidade do eixo do disco abrasivo da polidora com o do suporte e com o sistema de encaixe rápido, que irá facilitar a programação futura de trajetórias.

Esta peça foi projetada tendo em conta três aspetos principais: a polidora, o encaixe no sistema de troca de ferramenta e a possibilidade de pousar o conjunto (polidora-suporte-troca de ferramenta) numa mesa porta-ferramentas. Com isso em mente, este suporte foi concebido e fabricado, e está presente na figura abaixo. O desenho técnico desta peça encontra-se no anexo E.

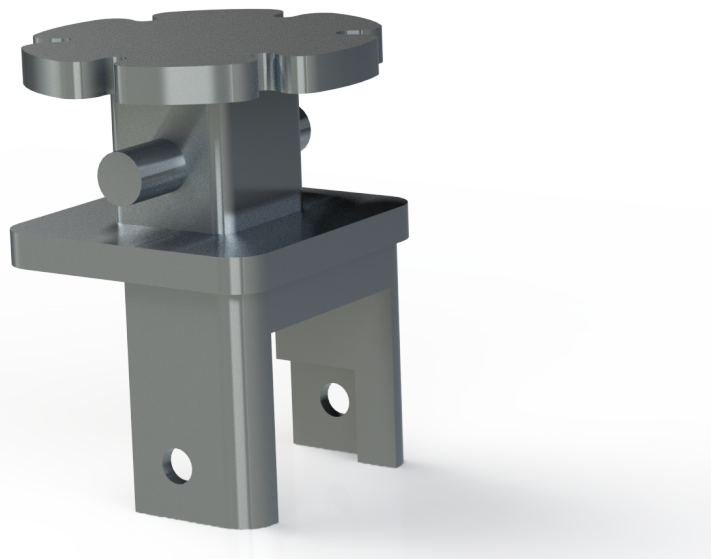


Figura 3.25: Suporte da ferramenta de polimento

Nas figuras 3.26a e 3.26b é possível visualizar o conjunto mencionado anteriormente e o *End-Of-Arm-Tool* total.



Figura 3.26: Conjunto de suporte da ferramenta de polimento e *End-Of-Arm-Tool*

3.8 Design da mesa porta-ferramentas

Os principais requisitos para esta parte integrante da célula robótica são o preço, a durabilidade e a estabilidade, indispensável para evitar movimentos indesejados. Estes podem levar o robô a falhar uma troca de ferramenta por desvio do ponto de recolha de ferramenta.

Com estes requisitos em mente, uma solução encontrada foi a utilização de perfis normalizados em alumínio como base da estrutura da mesa.

Algumas vantagens da utilização de perfis normalizados de alumínio são:

1. Resistência à corrosão;

- Como o ferro, o alumínio atrai o oxigénio, mas com uma grande diferença. O óxido de ferro - ferrugem - desprende-se, mas o óxido de alumínio apenas forma uma película protetora sobre a superfície. Isto leva a uma redução das despesas de processos de revestimento e elimina a manutenção.

2. Eliminar a soldadura;

- Soldar metal requer habilidade e experiência e, em contraste, uma única peça em alumínio extrudido pode substituir várias peças separadas que, de outro modo, seriam soldadas juntas.

3. Resistência do material;

- O alumínio tem maior resistência específica que muitos outros materiais. Também a extrusão maximiza a rigidez enquanto minimiza o peso. Isso faz com que seja uma boa escolha em aplicações de suporte de carga.

A mesa foi projetada utilizando um *software* próprio e especializado em estruturas em perfis de alumínio, o ccAssembler 3.1.

A partir daí, a estrutura foi exportada para um *software* CAD, para ser trabalhada e para se integrar os acessórios necessários.

Na figura 3.27 está presente a estrutura da mesa já montada, de onde se pode destacar a grande quantidade de suportes, que servem para aumentar a estabilidade da estrutura.



Figura 3.27: Mesa porta-ferramentas

Os acessórios anteriormente mencionados são os *brackets* de suporte das ferramentas, desenhados com o propósito de permitir o encaixe e armazenamento das ferramentas quando não em uso. Estes foram projetados tendo em conta o negativo do perfil do suporte da ferramenta, para permitir um encaixe seguro das peças.

No processo de desenvolvimento destas peças, foi planeada uma inclinação em relação ao plano horizontal da mesa. Isto tem como base a natureza do trabalho da polidora, pois ao polir mármore é requirida a introdução de água no meio de polimento, e a inclinação dos *brackets* leva a que não escorra água para o sistema de encaixe rápido e outros componentes elétricos.

Após algumas iterações chegou-se a um *design* final, representado na figura 3.28.

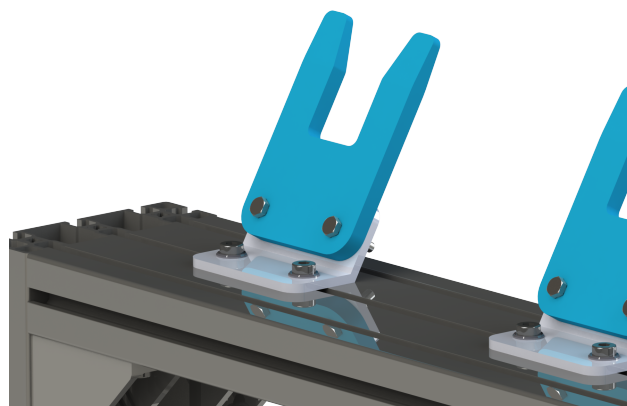


Figura 3.28: *Brackets* de suporte de ferramentas

Na figura seguinte está representado o posicionamento das ferramentas na mesa porta-ferramentas.

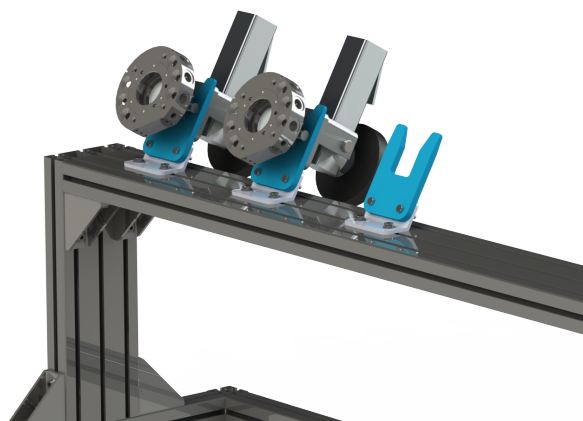


Figura 3.29: Conjunto mesa-ferramentas

Usando o *software* ANSYS™, na sua versão académica, foi possível simular a aplicação de uma carga equivalente ao peso das ferramentas e dos suportes na estrutura da mesa, com o intuito de obter o deslocamento vertical do perfil central quando sujeito a essa carga.

Esse deslocamento deve ser menor que a folga máxima de encaixe do sistema de troca rápida de ferramenta (ver Tabela 3.4), para se assegurar um encaixe constante e seguro entre o robô e a ferramenta.

Correndo a simulação, com uma carga vertical distribuída de 360 N, obtiveram-se os resultados presentes na figura 3.30.

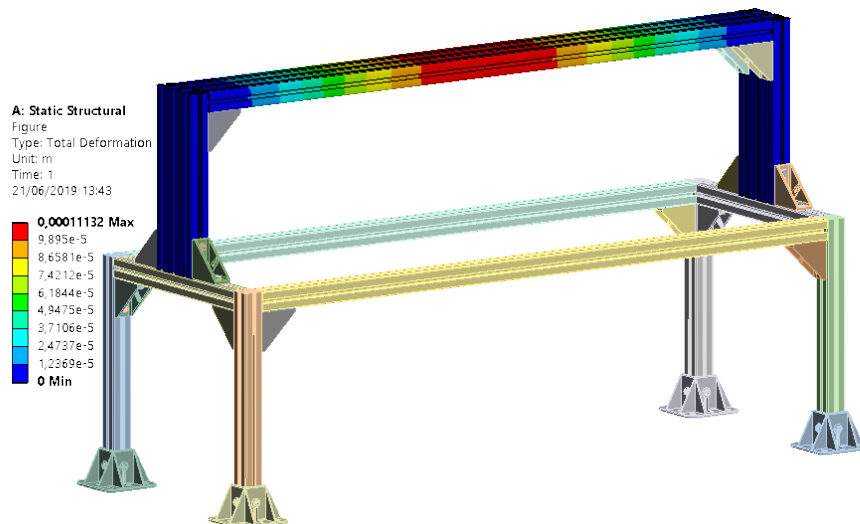


Figura 3.30: Resultados da simulação, obtidos usando o *software* ANSYS

Como se pode verificar, o deslocamento máximo do perfil é de 0.0011 mm, estando bastante abaixo dos 3 mm requeridos.

3.9 Escolha do robô industrial

Como a escolha do robô foi realizada previamente pela empresa, este capítulo irá focar-se nos detalhes principais do robô escolhido e em outras alternativas possíveis.

3.9.1 ABB IRB6700-200

O modelo escolhido é o IRB6700-200 da ABB. A capacidade de carga deste robô é de 175-200 kg (dependendo da escolha de LeanID ou não), tem um alcance de 2.60 m, um peso de 1300-1750 kg, uma repetibilidade de ± 0.1 mm e apresenta uma estrutura revoluta com 6 graus de liberdade [8]. Tem certificação IP67, que garante resistência à humidade, ferrugem e sujidade.



Figura 3.31: ABB IRB6700-200 [8]

3.9.2 Outras opções

Com base no modelo escolhido, é possível compará-lo a outros disponíveis no mercado. Estes são modelos semelhantes e que são específicos para trabalhos de maquinagem.

3.9.2.1 FANUC R-2000iC/210WE

Este robô, da série da FANUC com maior sucesso no mundo, tem uma capacidade de carga de 210 kg, com um alcance de 2.45 m, um peso de 1180 kg e uma repetibilidade de ± 0.1 mm. É um robô especialmente produzido para trabalho em ambientes húmidos ou de lavagem.



Figura 3.32: FANUC R-2000iC/210WE [43].

Com base na proteção especial anti-corrosão que é aplicada ao redutor e à superfície exterior, o R-2000iC/210WE é resistente à humidade e aos detergentes, sendo certificado com proteção padrão **IP67** (ver Anexo B).

O interior do robô, por exemplo ao nível dos motores, está protegido por tampas que selam a máquina e ajudam ao controlo de purga de ar. Todos os serviços internos (cabos, tubos de ar, etc.) são revestidos, de forma segura, numa mangueira robusta e flexível e também purgados de ar. Existem dois serviços de ar integrados a bordo, no entanto a unidade mecânica está preparada para fornecimento externo.

3.9.2.2 Yaskawa MH215 II

A Yaskawa recomenda, para aplicações de acabamento e polimento, a utilização dos robôs da série GP, no entanto informa que são indicados para peças frequentemente menores. Para peças, ou tarefas com peças maiores, recomendam os robôs MH215 ou MH250 devido ao seu maior *payload* e durabilidade.

Destes, o MH215 tem *payload* suficiente e comparável às outras opções, tendo uma capacidade de carga de 215 kg, um alcance de 2.90 m, um peso de 1140 kg e uma repetibilidade de ± 0.2 mm [10].



Figura 3.33: Yaskawa MH215 II [10].

Capítulo 4

Conclusões e Trabalho Futuro

Este projeto assentou no desenvolvimento de uma solução robótica para operações de polimento de peças em mármore, baseado na concepção de uma EOAT com capacidade de monitorização e regulação da força de contacto e sua integração numa célula robotizada.

Apesar dos robôs industriais terem sido introduzidos na realização de operações de acabamento na década de 70, esta é uma área ainda em grande desenvolvimento. Assim, toda a divulgação de informação referente à programação *off-line* de robôs, bem como os detalhes de algumas soluções existentes, é ainda muito reduzida, tornando o processo de contextualização do tema um pouco moroso. Por outro lado, a ausência de informação relativamente ao processo de polimento de pedra limitou a recolha de informação e levou à necessidade de obter a mesma recorrendo à experiência dos operadores da fábrica.

Foi desenvolvida uma ferramenta de acabamento com capacidade de regulação da força de contacto, ao longo de um grau de liberdade linear, segundo o qual é feita a acomodação das sobreespessuras das peças a maquinar.

Também houve um processo de desenvolvimento e decisão no que toca a todas as partes integrantes da célula robótica, desde o *software* escolhido à concepção da mesa porta-ferramentas.

Com este projeto, é esperado um aumento de produtividade e uma melhoria na uniformidade do acabamento das peças.

Na verdade, a partir do trabalho realizado, foi possível entender um pouco mais sobre a utilização de robôs em operações de polimento e perceber que este é um campo pouco explorado e que deve ser aperfeiçoado.

4.1 Satisfação dos Objetivos

A concretização deste projeto abarcou os seguintes objetivos:

- Conceber parcelas de uma célula de polimento automatizado;
- Conceber um EOAT (End-of-arm-Tool) e todas as suas partes integrantes;
- Definir os sistemas auxiliares a serem implementados;
- Parametrizar a célula em ambiente virtual.

Reverendo os objetivos propostos, é possível verificar que os mesmos foram maioritariamente cumpridos.

No que conta à conceção da EOAT, o seu *design* foi aprovado pela empresa mas, devido ao *timeframe* de entrega mais demorado, ainda não foi possível avaliar a sua eficácia.

O objetivo de parametrizar a célula no *software* escolhido não foi cumprido devido ao *software* ainda não ter sido adquirido.

4.2 Trabalho Futuro

Tendo no projeto realizado e neste documento uma base de conhecimentos sólida, é possível propor a execução de outros trabalhos que visam a continuação do projeto e a sua consolidação.

- Parametrizar a célula em ambiente virtual, ganhando experiência com o *software* escolhido;
- Calibrar o AFC e os parâmetros de polimento com peças de teste e comparar resultados com peças polidas à mão;
- Implementar um sistema de fecho e proteção das ferramentas armazenadas;
- Elaborar um estudo de um mecanismo de prensão e orientação das peças na célula;
- Estudar a possibilidade de comercialização das células robóticas.

Numa perspectiva mais ambiciosa, poderá pensar-se em elaborar um estudo de um mecanismo de posicionamento automático das peças e de alimentação da célula robotizada.

Referências

- [1] TCC WHITESTONE. Grammi S. <https://tccwhitestone.com/en/product/maami/grammis>, 2019. Acedido em: 2019-06-23.
- [2] I. Asimov. *Astounding Science-Fiction*. Runaround, 1942.
- [3] I. Asimov. *Robots and Empire*. Grafton Books, 1985.
- [4] G. S. Bolmsjö. *Industriell robotteknik*. Studentlitteratur, Lund, 2 edição, 1992.
- [5] L. Sciavicco e B. Siciliano. *Modelling and Control of Robot Manipulators*. Springer Verlag, 2000.
- [6] J. J. Craig. *Introduction to robotics mechanics and control*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1989.
- [7] J. Wallén. *The history of the industrial robot*. Department of Electrical Engineering Linköpings universitet, 2008.
- [8] ABB. IRB 6700 - The 7th generation of large industrial robots. <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-6700>, 2019. Acedido em: 2019-05-20.
- [9] KUKA. KR QUANTEC. <https://www.kuka.com/pt-pt/produtos-serviços/sistemas-de-robô/robôs-industriais/kr-quantec>, 2019. Acedido em: 2019-05-20.
- [10] Inc. Yaskawa America. MH Series. <https://www.motoman.com/products/robots/industrial/assembly/mh>, 2019. Acedido em: 2019-05-20.
- [11] Stäubli. High speed machining (hsm) robots. <https://www.staubli.com/en/robotics/product-range/6-axis-scara-picker-industrial-robots/application-pack/high-speed-machining-robots/>, 2019. Acedido em: 2019-05-20.
- [12] ISO. *ISO 8373:2012 - Robots and robotic devices – Vocabulary*. ISO, 2012.
- [13] COMET. *Plug-and-produce COmponents and METHods for adaptive control of industrial robots enabling cost effective, high precision manufacturing in factories of the future*. 2010.
- [14] M. W. Dawande, H. N. Geismar, S. P. Sethi, e C. Sriskandarajah. *Throughput Optimization in Robotic Cells*. Springer Science Business Media, 2007.
- [15] R. Bogue. *Finishing Robots: a review of technologies and applications*. Industrial Robot: an International Journal, 2009.

- [16] Corin. http://img.medicalexpo.com/images_me/photo-mg/80816-3391305.jpg, 2019. Acedido em: 2019-05-21.
- [17] MEPSA. http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/22721-5987079.jpg, 2019. Acedido em: 2019-05-21.
- [18] M. J. Tsai e J. F. Huang. *Efficient automatic polishing process with a new compliant abrasive tool*. Int J Adv Manuf Technol (2006), 2006.
- [19] A. Odham. *Active and Passive Force Control Robotic Deburring - A Complete Picture*. RIA Grinding, Deburring, and Finishing Workshop, 2007.
- [20] E. A. Erlbacher. *Force Control Basics*. PushCorp, Inc., 2002.
- [21] S. Mejri, V. Gagnol, T. Le, L. Sabourin, P. Ray, e P. Paultre. *Dynamic characterization of machining robot and stability analysis*. Int J Adv Manuf Technol (2016) 82: 351., 2016.
- [22] Plastics Machinery Magazine. *Advanced robots, work cells reduce workload*. https://cdn.plasticsmachinerymagazine.com/files/base/ebm/pmm/image/2018/06/960w/auto_flexicell_pallet_handling_robotic_palletizer.jpg, 2018. Acedido em: 2019-05-23.
- [23] ABB. Robôs ABB na linha de produção automóvel do SUV Haval H6. [http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/cb5fd739b301dcd4482579130027fe74/\\$file/RO_Haval_110922.jpg](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/cb5fd739b301dcd4482579130027fe74/$file/RO_Haval_110922.jpg), 2011. Acedido em: 2019-05-23.
- [24] Z. Pan et al. *Recent progress on programming methods for industrial robots*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2012.
- [25] R. V. B. Henriques. *Programação e Simulação de Robôs*. 2002.
- [26] ISO. *Segurança de máquinas, Princípios gerais de concepção, Apreciação do risco e redução do risco (ISO 12100:2010)*. ISO, 2010.
- [27] Inc. Epica International. Sandrob™ - surface processing system. <https://www.epicainternational.com/businesses/industrial-robotics/sandrob>, 2017. Acedido em: 2019-06-04.
- [28] Inc. Epica International. Arpp® - robotic simulation software. <https://knowledge.autodesk.com/support/powermill/getting-started/caas/simplecontent/content/powermill-getting-started-tutorial.html>, 2017. Acedido em: 2019-06-04.
- [29] Inovision. Smart products. <https://www.inovision.com/products>, 2018. Acedido em: 2019-06-04.
- [30] SprutCAM. What's new in sprutCAM 12. <https://kb.sprutcam.com/SCmanual/12/sprutcam/en/brief-and-to-the-point/what-s-new-in-sprutcam-12>, 2018. Acedido em: 2019-05-28.
- [31] Inc. Hypertherm. Hypertherm launches robotmaster v7. <https://www.robotmaster.com/en/newsroom/hypertherm-launches-robotmaster-v7>, 2019. Acedido em: 2019-05-28.

- [32] OCTOPUZ. OCTOPUZ interface. <http://events.octopuz.com/mediaresources/interface>, 2018. Acedido em: 2019-05-29.
- [33] Manufacturing Lounge. Autodesk launches powermill 2019 cam with new additive and simpler 5-axis. <http://www.manufacturinglounge.com/autodesk-launches-powermill-2019-cam-new-additive-simpler-5-axis/>, 2019. Acedido em: 2019-05-30.
- [34] Autodesk Inc. Powermill getting started tutorial. <https://knowledge.autodesk.com/support/powermill/getting-started/caas/simplecontent/content/powermill-getting-started-tutorial.html>, 2019. Acedido em: 2019-05-30.
- [35] Inc. ATI Industrial Automation. Compliance device model u1-050. https://www.ati-ia.com/products/compliance/UniversalCompensator_ModelDetails.aspx?id=U1-050, 2019. Acedido em: 2019-06-05.
- [36] Inc. PushCorp. Deburring | engine block & pipe | AFD & STC | end of arm robotic tooling. <http://www.pushcorp.com/afd1100.html>, 2019. Acedido em: 2019-06-05.
- [37] Robowork. Acf - active contact flange. <https://www.robowork.pt/pt/produtos/ferrobotics/acf-active-contact-flange>, 2019. Acedido em: 2019-06-05.
- [38] Inc. PushCorp. Afd1100 - active compliance force device. <http://www.pushcorp.com/afd1100.html>, 2019. Acedido em: 2019-06-05.
- [39] Inc. ATI Industrial Automation. Tool changers: Qc-40. <https://www.ati-ia.com/products/toolchanger/QC.aspx?ID=QC-40>, 2019. Acedido em: 2019-06-12.
- [40] SCHUNK GmbH & Co. KG. Technical data swk-041-000-000. https://schunk.com/de_en/gripping-systems/product/17984-0302346-swk-041-000-000/, 2019. Acedido em: 2019-06-12.
- [41] ABB. *Product specification-IRB 6700*. 2018.
- [42] SHINANO INC. Si-2322wr-le. <https://shinanoinc.com/products/standard-air-tools/sanders/wet-sander/si-2322wr-le.html>, 2019. Acedido em: 2019-06-12.
- [43] FANUC. R-2000ic/210we. <https://www.fanuc.eu/pt/pt/rob>, 2019. Acedido em: 2019-06-14.
- [44] École de Technologie Supérieure Québec. Singularities in six-axis vertically-articulated industrial robots. <http://coro.etsmtl.ca/blog/?p=107>, 2014. Acedido em: 2019-06-06.
- [45] Niryo. When to choose a 6 axis robotic arm ? <https://niryo.com/2017/11/choose-6-axis-robotic-arm/>, 2019. Acedido em: 2019-06-06.
- [46] ISO. *ISO 20653:2013 Road Vehicles-Degrees of protection (IP code) Protection of electrical equipment against foreign objects, water and access*. ISO, 2013.

Capítulo 5

Anexos

Anexo A

Singularidades

O Instituto Nacional Americano para Robôs Industriais e Sistemas Robóticos (ANSI / RIA R15.06-1999) define uma singularidade como “uma condição causada pelo alinhamento colinear de dois ou mais eixos do robô, resultando em velocidades e movimentos imprevisíveis do robô”. É mais comum em braços robóticos que utilizam um “punho triplo”. Este é um punho sobre o qual os três eixos, que controlam o *roll*, *pitch* e *yaw*, passam por um ponto comum. Um exemplo de uma singularidade do punho é quando o caminho através do qual o robô se desloca faz com que os primeiro e terceiro eixos do punho do robô (isto é, os eixos 4 e 6 do robô, visíveis na Figura A.1) se alinhem. O segundo eixo do punho então tenta girar 180° no tempo zero para manter a orientação do efector final.

O resultado de uma singularidade pode ser bastante dramático e pode ter efeitos adversos no braço do robô, na ferramenta e no processo em si.

Um segundo tipo de singularidade em robôs de seis eixos articulados ocorre quando o centro do punho está num cilindro que está centrado no eixo 1 e com raio igual à distância entre os eixos 1 e 4. Isso é chamado de singularidade do ombro. Alguns fabricantes de robôs também mencionam singularidades de alinhamento, onde os eixos 1 e 6 se tornam coincidentes. Isto é simplesmente um sub-caso de singularidades do ombro. Quando o robô passa perto de uma singularidade do ombro, a articulação 1 gira muito rápido.

O terceiro e último tipo de singularidade em robôs de seis eixos ocorre quando o centro do punho está no mesmo plano dos eixos 2 e 3 [44].

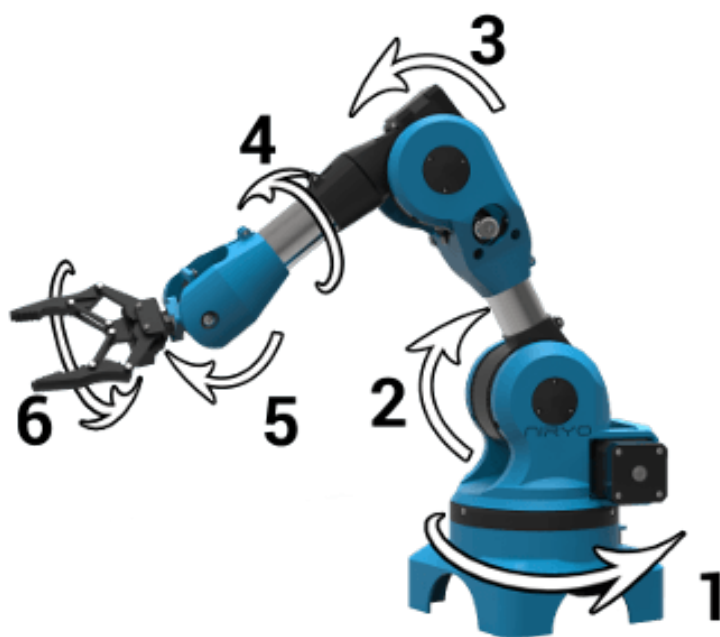


Figura A.1: Numeração dos eixos de um robô [45].

Anexo B

Níveis de classes de proteção IP

O código que define o grau de proteção IP é composto por 3 dígitos. O primeiro refere-se às partículas sólidas, o segundo ao meio líquido e o terceiro referir-se-ia à resistência ao impacto mecânico (deixou de ser utilizado). O código pode ser expresso, por exemplo, das seguintes formas: **IP01**, **IP21**, **IP42** [46].

Primeiro dígito:

- 0 - Não protegido
- 1 - Proteção contra objetos sólidos com 50 mm de diâmetro ou mais
- 2 - Proteção contra objetos sólidos com 12,5 mm de diâmetro ou mais
- 3 - Proteção contra objetos sólidos com 2,5 mm de diâmetro ou mais
- 4 - Proteção contra objetos sólidos com 1,0 mm de diâmetro ou mais
- 5 - Proteção contra poeira
- 6 - À prova de poeira

Segundo dígito:

- 0 - Não protegido
- 1 - Protegido contra gotas que caiam na vertical
- 2 - Protegido contra gotas que caiam na vertical com corpo inclinado a até 15°
- 3 - Protegido contra borrifos de água
- 4 - Protegido contra jorro de água
- 5 - Protegido contra jatos de água
- 6 - Protegido contra jatos potentes de água
- 7 - Protegido contra imersão temporária em água de até 1 metro por 30 minutos
- 8 - Protegido contra a imersão contínua em água
- 9K - Protegido contra água proveniente de jatos de vapor e alta pressão

Anexo C

Desenho Técnico: Adaptador Braço-AFC

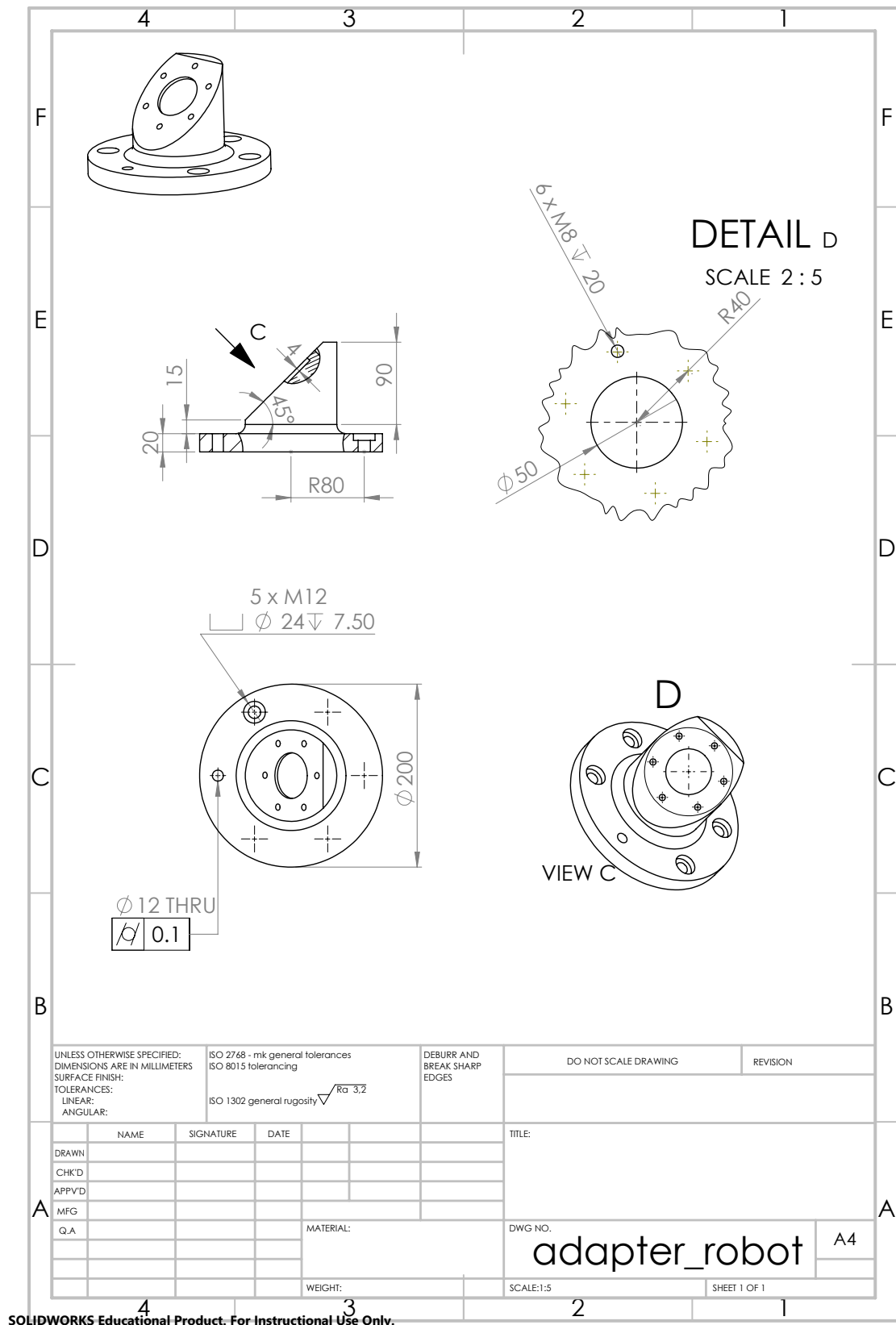


Figura C.1: Desenho Técnico: Adaptador Braço-AFC

Anexo D

Desenho Técnico: Adaptador AFC-Troca de ferramenta

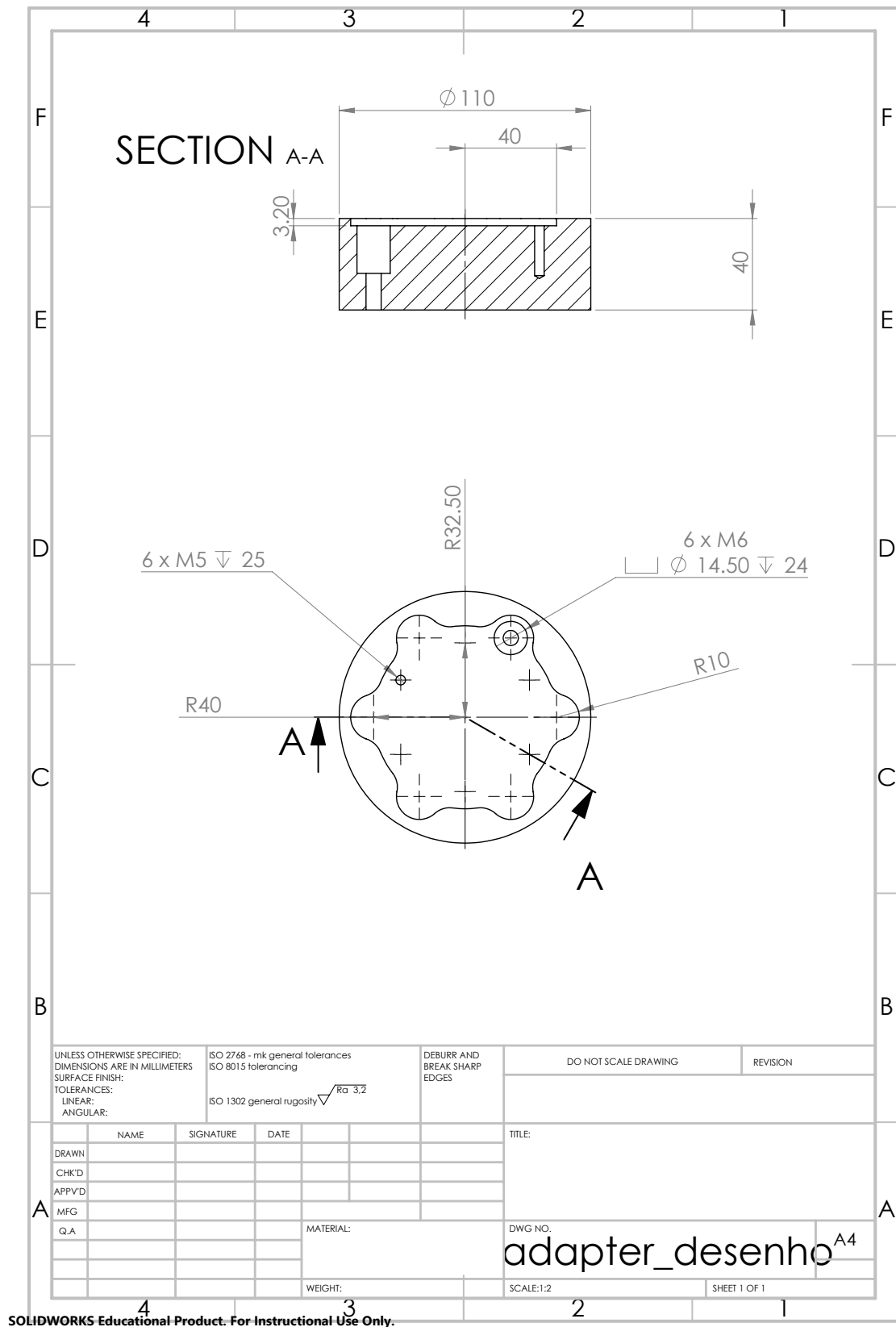


Figura D.1: Desenho Técnico: Adaptador AFC-Troca de ferramenta

Anexo E

Desenho Técnico: Suporte da ferramenta de polimento

